Ben Rabah

الجزء الرابع

الضوء والبصريات

البحث هو أن ترى ما رآه الآخرون
وأن تفكر فى مالم يفكر فيه أحد
ألبرت شنت - كيورى

من أكثر الموضوعات جاذبية وخلبًا للب ، والتى تناولـها العلماء بالبحث ، موضوع الضوء وعملية الرؤية . فنحن نعتمد عادة على حاسة البصر لدينا وعلى إدراكنا للألوان أكثر من اعتمادنا على أية حاسة أخرى لكى نكون معلومات مفصلة عن العالم من حولنا . وقد اكتشف البشر ـ على امتداد القرن السابع عشر ـ كيفية انعطاف الضوء (انكساره) عندما يمر من وسط إلى آخر ، وكيف ينعكس ، وكيف ينطوى الضوء الأبيض على طيف من الألوان . وكان من نتاج هذه المعرفة ابتكار العدسات والمرايا التى مكنتنا صناعتها من جعل الفلك يصبح كيانًا حقيقيًا كعلم يقوم على الرصد وأن يزدهر خلال القرن الثامن عشر .

وقد أحدث القرن التاسع عشر زيادة متفجرة فى فهمنا لخواص الضوء مثلما فعل فى بقية فروع الفيزياء التقليدية ؛ إذ اكتشف تداخل واستقطاب الموجات وقيست سرعة الضوء بدقة فى كل من الماء والهواء . وأدى استخدام الأجهزة المشتملة على منشورات زجاجية ومحزوزات الحيود إلى تحليل أطياف الضوء الصادر من مصادر متنوعة وبذلك ولد مجال دراسة الأطياف . وكانت تلك الأطياف مدخلاً لفهم تركيب الذرة خلال بدايات القرن العشرين . وقد بلغت نظريات الضوء أوجها مع معادلات ماكسويل التى وحدت بين دراسة البصريات من جهة والكهربية والمغناطيسية من جهة أخرى ، حيث تنبأت بوجود موجات كهرومغناطيسية فى مدى شاسع جدًا من الأطوال الموجية .

وكلما تقدمنا فى فهم الضوء ، كلما أصبحنا قادرين على ابتكار نظم تتيح لنا أن نرى بوضوح أكبر ونرى أبعد وبتفاصيل أدق بكثير عما هو ممكن بالعين المجردة . لقد أصبحنا نستطيع قياس مسافات أصغر وفترات زمنية قصيرة للغاية مما أضفى المزيد من الدقة على عمليات التصنيع ، وإلى ظهور مفاتيح أسرع للتحكم وأدوات حس أكثر حساسية ووسائل لمعالجة تخزين المعلومات أسرع وأكثر وثوقًا وأكفأ عن ذى قبل .

لقد بدأ بالكاد إحساسنا بأهمية الضوء فى حياتنا على الرغم من وضوح ذلك من خلال حاسة البصر لدينا . وستستمر تطبيقات الضوء فى الاتصالات والحسابات والصناعة إلى جانب مجالات أخرى كثيرة ، فى النمو والزيادة بمعدلات مذهلة . وإذا كان التحكم فى الإلكترونات من خلال علوم الإلكترونات قد كان سمة القرن الحالى ، فإن التحكم فى الفوتونات ـ علم الفوتونيات ـ سيكون هو سمة القرن الحادى والعشرين .



الفصل الثانى والعشرون



الموجات الكهرومغناطيسية

نواجه فى حياتنا اليومية العديد من صور الظواهر الموجية . ويتجلى تركيب الموجة لنا فى الموجات التى تظهر على صفحة الماء فى بحيرة أو غيرها وفى اهتزاز أوتار عود أو جيتار . على أن تركيب الموجات لا يمكن رؤيته فى حالة أنواع أخرى مثل موجات الصوت مثلاً ، وإن كنا نعرف من دراساتنا السابقة أن موجة الصوت تتكون من اهتزازات تحدث فى ضغط جزيئات الهواء . كما أن هناك نوعًا آخر من الموجات التى لا يكون تركيبها ظاهرًا لنا ، ومثالها الموجات اللاسلكية ، وموجات الضوء والموجات تحت الحمراء والموجات الميكروئية (الدقيقة) . وتستطيع كل هذه الموجات الانتقال وحمل الطاقة خلال الفضاء الفارغ مما يثير سؤالاً حول ماهية ما يتموج فى الفراغ . ويطلق على الموجات المذكورة توًا اسم **الموجات الكهرومغناطيسية** وطبيعة هذه الموجات هى موضوع دراستنا فى هذا الفصل .

22-1 المجالات الكهربية والمغناطيسية المهتزة ؛ معادلات ماكسويل

يعتبر تفسير الموجات الكهرومغناطيسية على يدى الفيزيائى الأسكتلندى جيمس كلارك ماكسويل (1831 – 1879) أحد أعظم الإنجازات فى تاريخ العلم . وقد وضع ماكسويل نظريته فى ستينيات القرن التاسع عشر . وقبل أن نشرع فى التعرف على عمله سنقوم بمراجعة لما كان معروفًا حول الكهربية والمغناطيسية حتى ذلك الوقت .

بحلول منتصف القرن التاسع عشر ، استقرت المبادئ الأساسية التالية والتى درسنا كلاً منها فى الفصول السابقة :

1 وجود شحنة موجبة وأخرى سالبة وقانون كولوم للقوة بين شحنتين . تم الاستقرار على أن الشحنات هي مصدر المجالات الكهربية بحيث تنطلق المجالات من الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة .

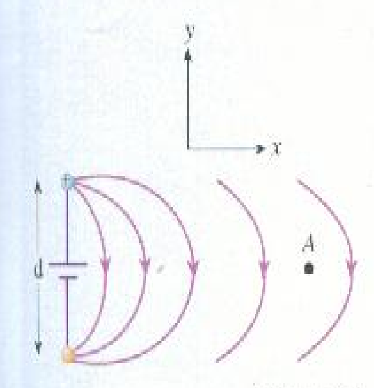
2 استقر أيضًا أن الشحنات المتحركة أو التيارات هي مصدر المجالات المغناطيسية ويصف قانون أمبير العلاقة بين التيار الكهربي والمجال المغناطيسي .

3 تتكون خطوط المجال المغناطيسي من حلقات مقفلة ، لا بداية لها ولا نهاية ، ويعد هذا تعبيرًا عن أنه لا وجود للأقطاب الأحادية ، وأن الأقطاب المغناطيسية تتواجد دائمًا على هيئة أزواج متضادة ، شمالية وجنوبية .

4 يمكن توليد مجال كهربي بواسطة مجال مغناطيسي تتغير شدته مع الزمن ؛ ويلخص هذا قانون فاراداي للحث .

من المهم تذكر أن الصيغة الرياضية لهذه المبادئ الأساسية تحتوي على ثابتين فيزيائيين هما μ_0 و ϵ_0 وقد التقينا بهما في الفصلين السادس عشر والتاسع عشر . وكانت القيمتان المقاستان لهذين الثابتين معروفة لدى ماكسويل .

سنفحص الآن خواص توزيع خاص للشحنات وهو ما يسمى ثنائي القطب الكهربي . وكما درسنا في الفصل السابع عشر ، فإن ثنائي القطب هذا يتكون من شحنتين متساويتين ومتعاكستين في الإشارة تفصلهما مسافة محددة ولتكن d . ويبين الشكل 22-1 طريقة بسيطة لخلق ثنائي قطب باستخدام بطارية حتى نشحن كرتين موصلتين صغيرتين متصلتين بطرفي البطارية المتعاكسين . وجانب من المجال الكهربي الأستاتيكي (الساكن) الذي يحدثه ثنائي القطب مبين في الشكل 22-1 . وشدة هذا المجال - بعيدًا بمسافة تزيد كثيرًا عن d - تتضاءل في تناسب عكسي مع مكعب المسافة إلى ثنائي القطب .



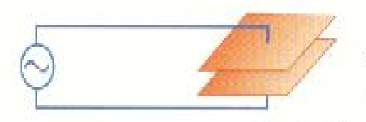
شكل 22-1:
جانب من المجال الكهربي اللحظي بالقرب من كرتين مشحونتين . وعندما تهتز الشحنات جيئة وذهابًا بين الكرتين فإن المجال الكهربي عند النقطة A يتغير اتجاهه بالتناوب إلى أعلى وإلى أسفل .

افترض الآن أننا قمنا بعكس قطبية البطارية بشكل مفاجئ . إن هذا كما نعلم سيجعل اتجاه المجال المبين في الشكل 22-1 ينعكس . ولنا أن نسأل هنا سؤالاً أساسيًا : « هل يمكن الإحساس بهذا التغير في المجال فورًا وفي كل مكان ؟ » . وبعبارة أخرى هل ستعاني شحنة اختبار موضوعة عند النقطة A من انعكاس القوة الكهربية ؟ ليس فيما درسناه حتى الآن ما يمكننا من الإجابة على هذا السؤال ، ولذا فلنُقْدِم على فحص ملاحظة أخرى .

عندما نعكس قطبية البطارية فإن الشحنة لابد وأن تسري على طول ثنائي القطب خلال عملية عكس المجال الكهربي . وفي غضون هذا لابد أن يتكون مجال مغناطيسي بسبب التيار الذي خلفه سريان الشحنة . والسؤال الذي يثور الآن هو : « هل يمكن الإحساس بهذا المجال المغناطيسي على الفور عند النقطة A ؟ » .

على أن هناك سؤالاً آخر يثور تأسيسًا على هذه الملاحظة . عند عكس فولطية البطارية ، فإننا نحدث تغيرًا في المجال الكهربي . وهذا التغير يؤدي بدوره إلى خلق مجال مغناطيسي بسبب التيار الناشئ عن سريان الشحنة بين الكرتين . هل بإمكاننا

تعميم هذا التأثير ليشمل حالة لا يكون فيها سريان للشحنة في منطقة المجال الكهربي المتغير ؟ وبعبارة أخرى : « هل يستحث المجال الكهربي المتغير مجالات مغناطيسية وإن لم يكن هناك شحنات تسري ؟ » .



شكل 2-22:
هل يخلق المجال E المتغير بين اللوحين مجالاً مغناطيسيا B ؟

وللإجابة على هذا السؤال سنعتبر مثال لوحي المكثف في الشكل 2-22 . عند تغيير قطبية اللوحين ، لا تسري شحنات بينهما ، فالتيار سيسري فقط في الدائرة الخارجية ، التي يمكن ترتيبها بحيث تكون الأسلاك التي توصل بين البطارية واللوحين وكذا الشحنات التي تحملها الأسلاك بعيدة تماماً عن الحيز المحصور بين اللوحين . وإذا ما وصلنا اللوحين بجهد مهتز ، فهل **يستحث** المجال الكهربي المتغير بين اللوحين مجالاً مغناطيسيًا بينهما حتى ولو لم تَسْرِ شحنات بين اللوحين ؟ إن هذا المبدأ - أي فكرة إمكانية أن يستحث مجال مغناطيسي بواسطة مجال كهربي متغير - لم يكن معروفًا في الوقت الذي كان ماكسويل يدرس فيه هذا السؤال .

لقد لاحظ ماكسويل أن قوانين الكهربية والمغناطيسية المعروفة تفتقر إلى التماثل بين المجالين E و B : فقد كان معروفًا أن مجالات B المتغيرة تستحث مجالات E ؛ ولم يكن هناك مقابل معروف لهذا القانون ، ويكون من شأنه التنبؤ بأن مجالات E المتغيرة لابد وأن تستحث مجالات B . وخطا ماكسويل الخطوة الجريئة بأن تبنى الفكرة الأخيرة . وقد افترض وجود تيار تصوري أسماه **التيار الإزاحي** I_D وهو يتناسب مع المعدل الزمني لتغير المجال الكهربي في منطقة ما . . وبتحديد أكبر ، قام ماكسويل بتعريف **الفيض الكهربي** ϕ_E خلال مساحة ما A بنفس الأسلوب الذي نُعرِّف به المجال المغناطيسي في المعادلة 1-20 : فبالنسبة للمجال E المنتظم عبر مساحة ما A :

$$\phi_E = E_\perp A$$

حيث $E_\perp$ هي مركبة $\mathbf{E}$ العمودية على المساحة A . ثم كتب ماكسويل التيار الإزاحي الذي اقترحه على الصورة :

$$I_D = \epsilon_0 \frac{\Delta \phi_E}{\Delta t} = \epsilon_0 A \frac{\Delta E_\perp}{\Delta t}$$

وبإمكانك التأكد من أن وحدات هذا التعبير هي الأمبير . ثم جاءت النقطة الحاسمة في فكرة ماكسويل الجديدة وهي أن المجالات المغناطيسية يمكن خلقها بواسطة **كل من** I_D والتيار الحقيقي I . ولذا فقد استعمل مجموع الحدين ليحصل على $I_{tot} = I_D + I$ ، في قانون أمبير بدلاً من استعمال I بمفرده .

وقد صاغ ماكسويل القوانين المعروفة بالإضافة إلى فرضه الجديد على هيئة صيغ رياضية تعرف بالمعادلات التفاضلية ، وعلى الرغم من أننا لا نستطيع طرح التفاصيل الرياضية ضمن هذا المقرر إلا أننا سنقدم عددًا من الملاحظات المهمة والشيقة بصورة وصفية .

ولما كانت معادلات ماكسويل تتضمن ما كان معروفًا بالفعل حول الكهربية والمغناطيسية فإنها احتوت الثابتين الفيزيائيين المعروفين ϵ_0 و μ_0 . وقد استطاع ماكسويل اشتقاق معادلات تعتمد على الزمن وتربط بين $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ وذلك بدمج معادلاته التفاضلية . ويمثل حل تلك المعادلات اهتزازات - جيبية (موجات) تعبر عن قيم شدة

المجالات . وتنبأت المعادلات ـ إلى جانب ذلك ـ أن هذه الاهتزازات ـ أو ما نطلق عليه الآن **الموجات الكهرومغناطيسية** ـ تنتقل خلال الفضاء الفارغ بسرعة موجية v تتحدد فقط بالثوابت الأساسية الواردة بالمعادلات :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

وحيث أن قيم هذه الثوابت كانت معروفة بالفعل فقد تمكن ماكسويل (وكذلك تستطيع أنت !) من حساب مقدار هذه السرعة :

$$v = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T.m/A})(8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2/N.m^2})}} = 2.998 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$$

من المدهش أن هذا بالضبط هو مقدار سرعة الضوء c ! ولأول مرة فى التاريخ أمكن الربط بين الضوء المرئى (الذى يقع فى مجال دراسة البصريات) والكهربية والمغناطيسية . ويلاحظ أنه بما أن سرعة الضوء تتعين من ثابتين أساسيين ، **فلابد أنها هى الأخرى ثابت فيزيائى كونى** . ولم يؤد فرض ماكسويل حول المجالات المغناطيسية المستحثة إلى تفسير طبيعة موجات الضوء فحسب وإنما تنبأ بأن الموجات الكهرومغناطيسية يمكن أن تتخذ **أية** ترددات بما فيها ما هو فوق ترددات الضوء المرئى ($\approx 10^{15}$ Hz) وما هو تحتها وقد تمكن العالم الألمانى هاينرش هيرتز فى عام 1887 ، أو بعد موت ماكسويل بنحو عشر سنوات ، أن ينتج موجات كهرومغناطيسية ذات ترددات بالقرب من 10^8 Hz ، وهى الموجات التى نطلق عليها الآن **الموجات اللاسلكية** (موجات الراديو) . وقد قاس هيرتز الطول الموجى لموجاته تلك وحسب مقدار سرعتها فوجده مساويًا 3.2×10^8 m/s ، بدقة تكفى ـ باستعمال التجربة ـ لإثبات أن الضوء وموجات اللاسلكى ما هى إلا أمثلة على نفس نوعية الظواهر الموجية .

سنعود الآن إلى الأسئلة التى طرحناها فى بداية هذا القسم .

1 هل تنتقل تغيرات المجالين الكهربى والمغناطيسى إلى جميع النقط لحظيًا ؟ الإجابة هى **لا** . إن التغير فى أى من المجالين ينطلق من المصدر بسرعة مقدراها c ولذا فعند نقطة تقع على مسافة r من المصدر ، يكون الإحساس بهذا التغير فى زمن مقداره $t = r/c$.

2 هل يستحث مجال كهربى متغير مجالاً مغناطيسيًا حتى فى الفضاء الفارغ حيث لا تسرى أية شحنة ؟ **نعم** . فبدون هذا المبدأ ، لكانت قوانين الكهربية والمغناطيسية الأخرى ناقصة ولا يمكنها تفسير الموجات الكهرومغناطيسية . وقد ثبتت صحة فرض ماكسويل من حقيقة أن الموجات الكهرومغناطيسية موجودة ومن حقيقة أن خواصها المقاسة معمليًا تتفق مع تنبؤاته .

تنطوى كل أشكال الموجات التى درسناها من قبل كموجات الصوت والماء وموجات الأوتار على اهتزازات فى المادة التى تحمل تلك الموجات . وما لم تكن هناك مادة تهتز ، لما وجدت تلك الموجات . . مثلما يتضح ذلك من قرع جرس داخل غرفة مفرغة من الهواء . وبدون الهواء اللازم لحمل الذبذبات الصادرة عن الجرس فلن يصدر صوت ولا

تتمكن من سماع الجرس . أما فى حالة الموجات الكهرومغناطيسية التى تنتقل عبر فضاء فارغ ، فلن يحتاج الأمر إلى مادة تحمل تلك الموجات . إن المجال الكهربى E الذى يتغير جيبيًا يستحث مجالاً مغناطيسيًا B يتغير هو الآخر جيبيًا . ويستحث هذا المجال بدوره مجالاً كهربيًا E يتغير جيبيًا وهكذا . . أى أن المجالين المهتزين يجدد كل منهما الآخر مع انتشار الطاقة الموجودة فى المجالين عبر الفضاء بسرعة مقدارها c . وكما هو الحال مع كل أنواع الموجات فإن تردد الموجة الكهرومغناطيسية يتحدد بتردد المصدر . وعندما يكون لدينا ثنائى قطب كهربى فالتردد هنا هو الخاص بالجهد المهتز المطبق . والطول الموجى للموجة الناتجة يكون من ثم هو :

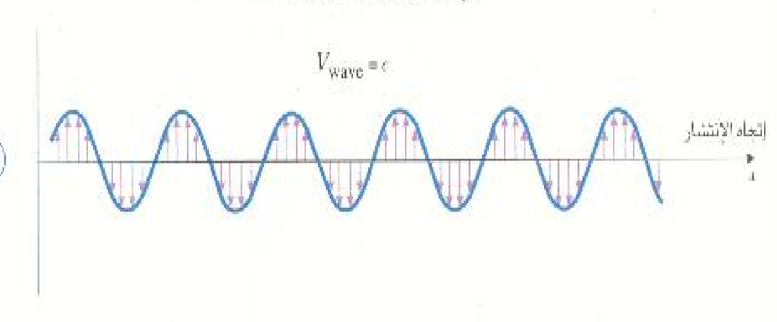
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f} \qquad (22\text{–}1)$$

وقد استقر لدينا حاليًا أن معادلات ماكسويل تعتبر أساسية ومهمة بالنسبة للكهرومغناطيسية مثلما تعتبر قوانين نيوتن بالنسبة للميكانيكا . ولذا تشكل معادلات ماكسويل الأساس لجميع الأعمال النظرية فى مجال الكهرومغناطيسية .

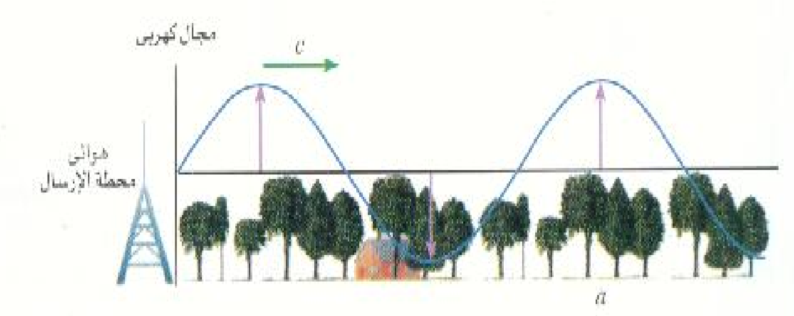
22-2 الموجات الكهرومغناطيسية الصادرة من هوائى ثنائى القطب

الآن وقد ناقشنا النتائج العامة لنظرية ماكسويل سنفحص عن قرب أكبر الموجات الكهرومغناطيسية التى يولدها جهد مهتز مطبق على ثنائى قطب كهربى . سنقوم أولاً بتوصيل مصدر جهد متردد التيار إلى قضيبين موصلين كما هو موضح على يسار الشكل 22-3 . ويقوم مصدر التيار المتردد بجعل الجهد المطبق يتغير جيبيًا بتردد مقداره f :

$$V_{\text{source}} = V_0 \sin 2\pi ft$$



شكل 3-22:
تبعث الشحنات المترددة على هوائى ثنائى القطب اضطراب مجال كهربى بعيدًا عن الهوائى .



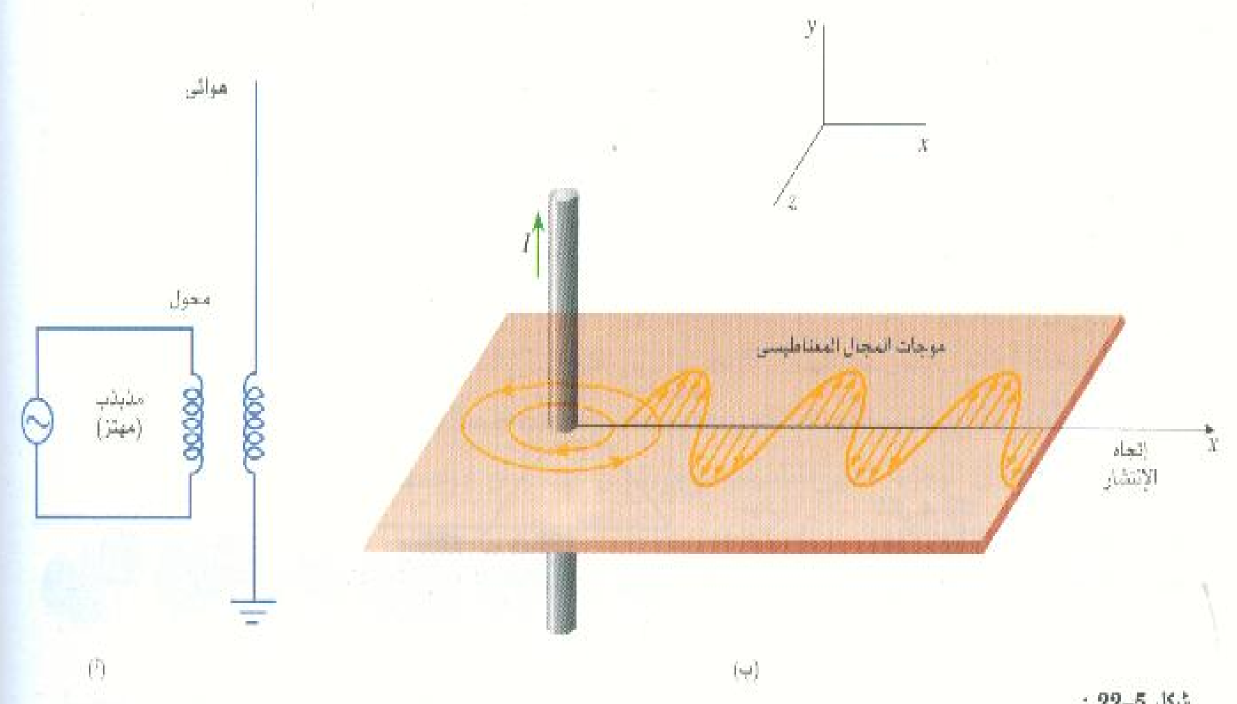
شكل 4-22:
تغطى موجة المجال الكهربى التى يبثها الهوائى مساحة قد تكون بعيدة عن محطة الإرسال .

نستطيع أن ننظر إلى المجال الكهربى على أنه اضطراب يبعث به مصدر ثنائى قطب وذلك مثلما نعتبر الموجة التى تتكون على وتر على أنها اضطراب يدفع للانتقال عبر

الوتر بواسطة مصدر مهتز . ويمثل الشكل 3-22 المجال المنتشر عبر محور x فى لحظة معينة . إن المجال يبين تاريخ الشحنة على ثنائى القطب . لقد أطلقت المجالات المتجهة إلى أسفل عندما كانت قمة ثنائى القطب موجبة ، أما المجالات المتجهة إلى أعلى فقد أطلقت متأخرة نصف دورة ، عندما كانت قمة ثنائى القطب سالبة . وتنتقل هذه الموجة مبتعدة خارج ثنائى القطب بسرعة الضوء c .

وفى حالة محطة إذاعة فإن ثنائى القطب (الهوائى) غالبًا ما يكون مجرد سلك طويل . ولو أنك زرت محطة إرسال إذاعى لرأيت أن الهوائى عبارة عن سلك طويل ـ يمتد بين برجين مرتفعين أو سلك رأسى مثبت على برج واحد . وتنتشر الشحنات على الهوائى بواسطة جهد متردد التيار صادر من نظام محولات خاص . وتغطى موجة المجال الكهربى الذى يبثه الهوائى الأرض من حوله ، كما هو مبين فى الشكل 4-22 . وينعكس المجال دوريًا مع مرور الموجة عند نقطة مثل a على مسار الموجة . وتردد المجال الكهربى المهتز عند a هو نفس تردد المصدر . ونلاحظ إلى جانب ذلك ، أن المقدار الذى يتذبذب ، وهو متجه المجال الكهربى ، يكون متعامدًا دائمًا على اتجاه انتشار الموجة . وعلى ذلك تكون موجة المجال الكهربى موجة مستعرضة (القسم 11-14) .

ومن السهل ملاحظة أن هوائى محطة الإذاعة يولد بالضرورة موجة مجال مغناطيسى عندما يولد موجة مجال كهربائى ولبيان ذلك يُرجع إلى الشكل 5-22 ، حيث تتحرك الشحنات ، عند محطة الإذاعة إلى أعلى وإلى أسفل الهوائى المبين فى الشكل 5-22 (أ) لتنتج شحنات مترددة كما سبق وناقشنا . وتحدث هذه الشحنات المتحركة تيارًا مترددًا فى الهوائى ، وحيث أن هناك مجال مغناطيسى يحيط بالتيار فإن مجالاً مغناطيسيًا مهتزًا ينتج هو الآخر كما يبين الشكل 5-22 (ب) . ومثلما ينتشر المجال الكهربى المهتز

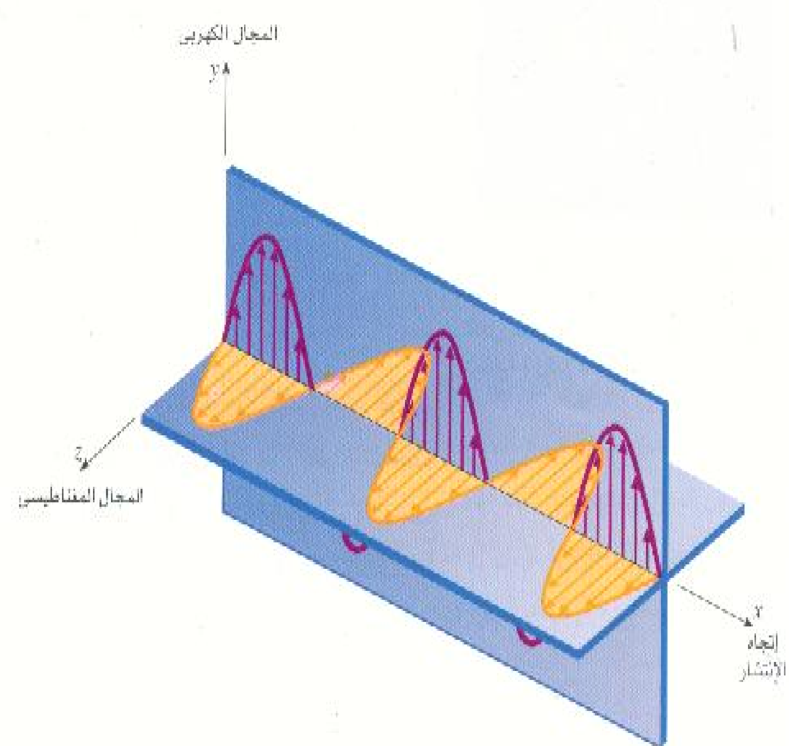


شكل 5-22 :
(أ) مع اندفاع الشحنة إلى أعلى وإلى أسفل الهوائى ، (ب) موجة المجال المغناطيسى تنتشر مبتعدة كما هو مبين .

فإن المجال المغناطيسي ينتقل هو الآخر عبر محور x على هيئة موجة مستعرضة . وبما أن اتجاه التيار يهتز ، فإن اتجاه المجال المغناطيسي هو الآخر يفعل نفس الشيء .

ويلاحظ من هذا ، أن المجال المغناطيسي يكون في اتجاه محور z ، بينما يكون المجال الكهربي في اتجاه المحور y . . وكما يتضح من الشكل 6-22 فإن المجال المغناطيسي متعامد مع كل من المجال الكهربي واتجاه انتشار الموجات . وقد رسمت الموجتان متوافقتين في الطَّور (أي أنهما تصلان إلى قمتيهما معًا) . وإن كان هذا ليس بالضرورة واضحًا عند مسافات تبعد عن الهوائي بالعديد من أطوال الموجات ، حيث أن الأمر يتطلب حسابات مفصلة .

ومن السمات الأخرى لتولد الموجات الكهرومغناطيسية التي لابد من التأكيد عليها أن الشحنات التي تهتز إلى أعلى وإلى أسفل الهوائي تكون في حالة تسارع . ومن المعروف أن الشحنات إذا تسارعت (تحركت بعجلة) فإنها تبعث بإشعاع كهرومغناطيسي وكلما زاد التسارع (أو التباطؤ) زاد انبعاث الإشعاع من الشحنات . ولهذا فلو تعرض جسيم يتحرك بسرعة لتصادم ما فإنه يطلق دفعة من الإشعاع الكهرومغناطيسي عندما يتوقف فجأة .



شكل 6-22:
تكون موجة المجال المغناطيسي متعامدة مع كل من المجال الكهربي واتجاه الانتشار .

مثال توضيحي 1-22

بدأ إرسال أول محطة إذاعة وهي المعروفة باسم (KDKA) في مدينة بتسبرج بالولايات المتحدة الأمريكية في عام 1920 وبهذا كانت أقدم محطة إذاعة وكانت تعمل عند تردد مقداره 1.02×10^{6} Hz . ما هو الطول الموجي لموجة اللاسلكي التي تعمل عليها المحطة ؟
اعتبر سرعة الموجات المغناطيسية 3×10^{8} m/s ؛

استدلال منطقى : نعلم أن $\lambda = v/f$ بالنسبة لأى موجة . وفى حالتنا هذه $v = 3 \times 10^8$ m/s و $f = 1.02 \times 10^6$ Hz . وبالتعويض نجد أن $\lambda = 294$ m .

تدريب : يبلغ الطول الموجى لموجات الرادار (الميكروئية) عدة سنتيمترات . ما هو تردد موجة كهرومغناطيسية طولها الموجى 20 cm ؟ **الإجابة :** 1.5×10^9 Hz .

22-3 أنواع الموجات الكهرومغناطيسية



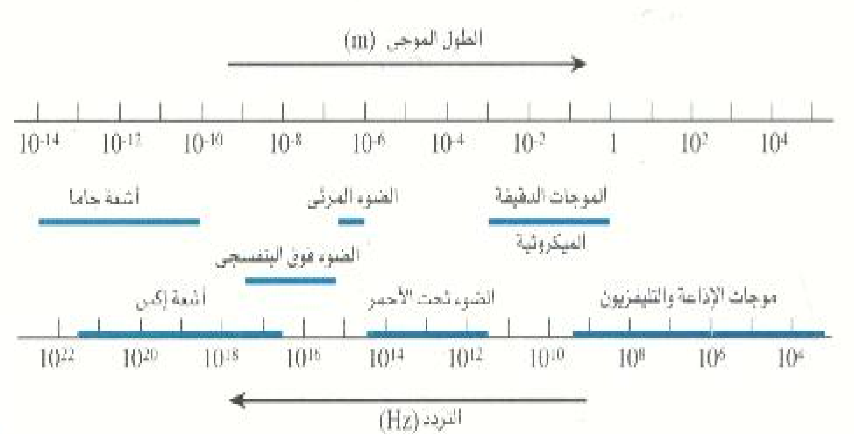
تستخدم الهوائيات التى على شكل أطباق كالموضح فى الصورة ، لاستقبال الموجات الكهرومغناطيسية التى تبث بأطوال موجية لاسلكية (راديو) من أجسام فى الفضاء .

يوجد بالإضافة إلى موجات الضوء المرئى والراديو ، مدى عريض من الأطوال الموجية (الترددات) للموجات الكهرومغناطيسية والتى قد اعتدنا عليها . ويسمى هذا المدى **طيف الموجات الكهرومغناطيسية** . وتنتج الأطوال الموجية المتنوعة بالعديد من الطرق سواء أكانت طبيعية أم هندسية . كما أن هناك عددًا من الأجهزة المختلفة والتقنيات التى تستخدم للكشف عن الموجات الكهرومغناطيسية الواقعة فى أجزاء متفرقة من الطيف .

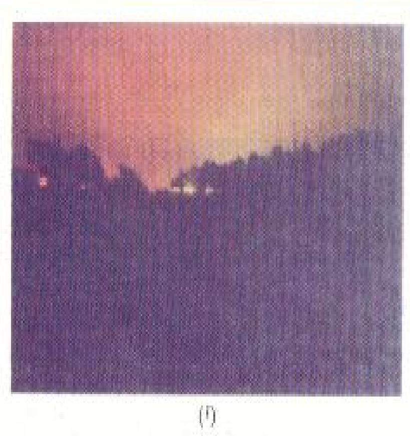
يوضح الشكل 7-22 الطيف الكهرومغناطيسى . وقد وجد أنه من المناسب تقسيم الطيف إلى فئات الموجات المبينة ، على الرغم من أن التقسيم اختيارى وقد تتراكب الفئات فيما بينها . ويلاحظ أن الأطوال الموجية تزداد فى اتجاه اليمين بينما تزداد الترددات فى اتجاه اليسار . وبالنسبة لجميع الموجات فإن $c = f\lambda$. ويلاحظ أيضًا أن الطيف يغطى مدى هائلاً من القيم يصل إلى 20 من قوى (أسس) العدد 10 . وسنناقش كل فئة بإيجاز .

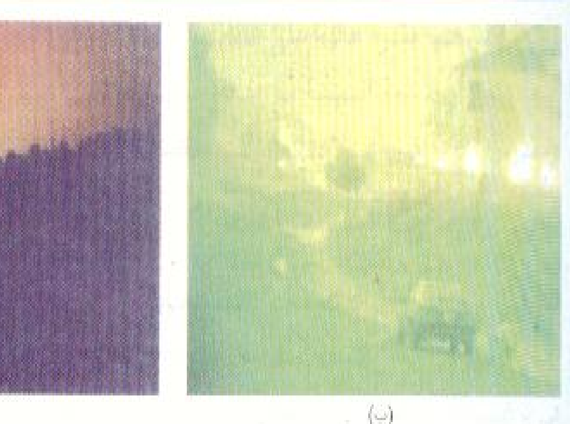
موجات اللاسلكى (أو الراديو)

تتكون منطقة الموجات اللاسلكية من الطيف من كل الأطوال الموجية التى يزيد طولها عن 1 m تقريبًا . ويلاحظ أن مدى الترددات المناظر يرتفع إلى نحو 10^9 Hz . وتستخدم أجهزة FM المدى الواقع بين $f = 88$ MHz و $f = 108$ MHz ، كما هو موضح وتستطيع رؤيته على جهاز الراديو الخاص بك . أما جهاز AM فيغطى المدى من $f = 500$ kHz



شكل 7-22:
أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسى ، وتبين القضبان المدى التقريبى للأطوال الموجية فى كل نوع من أنواع الإشعاع .


(أ)


(ب)

تستمر الأجسام الساخنة فى إطلاق الموجات تحت الحمراء حتى أثناء الليل عندما يؤدى اختفاء الضوء المرئى إلى جعل الدنيا ظلامًا . وتمثل هاتان الصورتان نفس المنظر الذى التقط فى نفس الوقت . الصورة (أ) التقطت على فيلم حساس للضوء المرئى . بينما تمثل الصورة (ب) الجزء الأوسط من (أ) مكبرًا بعد أن يتم التقاطه بجهاز الرؤية الليلية الحساس للأشعة تحت الحمراء . وزمن التعرض للضوء فى الصورتين هو 1/4 ثانية .

إلى 1600 kHz . ويحتل الإرسال التليفزيونى أشرطة الترددات الواقعة على جانبى منطقة FM . ويخضع تحديد مناطق الترددات المختلفة الخاصة بالأغراض المتنوعة لتنظيمات فيدرالية وذلك منعًا لأى لبس مزعج .

الموجات الدقيقة (الميكروئية)

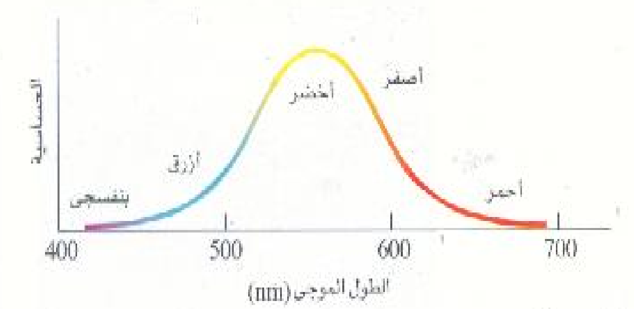
هذه الموجات - كما يدل اسمها - هى موجات لاسلكية (راديو) قصيرة للغاية ، وتضم هذه الفئة الرادار وأفران الميكروويف وأجهزة الاتصالات المستخدمة فى نقل المكالمات التليفونية لمسافات بعيدة .

الموجات تحت الحمراء

يمتد مدى الموجات تحت الحمراء من الطرف ذى الموجات ذات الطول الموجى القصير فى منطقة الموجات الميكروئية (الأشعة تحت الحمراء البعيدة) إلى الحافة الحمراء للضوء المرئى (الأشعة تحت الحمراء القريبة) . وعادة ما نعبر عن الأطوال الموجية لهذه الموجات بوحدات الميكرون (μ) ($1\mu = 1\mu m = 10^{-6}$ m) . وتنبعث إشعاعات الموجات تحت الحمراء من كل الأجسام الدافئة والحارة . كما أن هذه الموجات تمتص بشدة فى العديد من الجزيئات بما فى ذلك الماء وثانى أكسيد الكربون وعند امتصاصها ، تتحول طاقة الموجة إلى طاقة حرارية تؤدى إلى تسخين الجسم الماص . ولهذا السبب كثيرًا ما يطلق الاسم الخاطئ « الإشعاع الحرارى » على الأشعة تحت الحمراء .

الضوء المرئى

هناك جزء من الطيف الكهرومغناطيسى بمقدور العين البشرية أن تحس به . . وهو ما يعرف بالضوء . وهو يحتل مدى صغيرًا للغاية من أطوال الموجات يقع بين 400 و 700 nm . وندرك بأبصارنا ما نسميه « الألوان » داخل إطار هذا المدى . . وتتراوح هذه الألوان بين البنفسجى مرورًا بالأزرق فالأصفر فالبرتقالى ثم الأحمر . ويبين الشكل 8-22 كيفة تغير حساسية العين البشرية مع الطول الموجى ؛ حيث تصل قمة الحساسية عند نحو 550 nm . إن الإلكترونات التى تمر بتغيرات فى الطاقة داخل الذرات هى التى تقوم بدور الهوائى الذى يصدر الضوء .



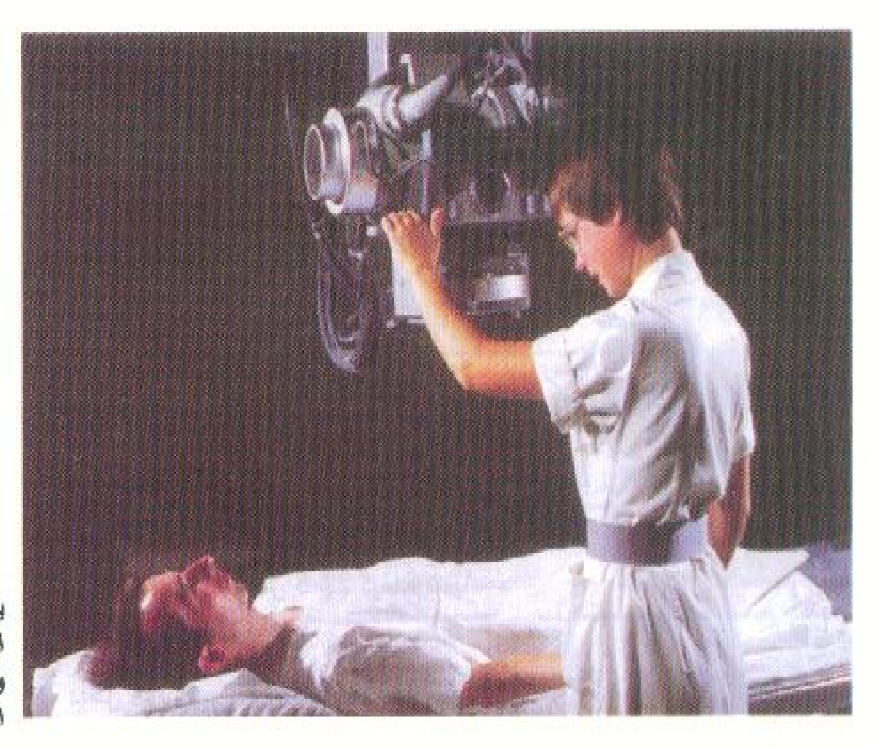
شكل 8-22:
منحنى حساسية العين البشرية . حيث يلاحظ أن الحساسية أقصى ما تكون للضوء الأصفر المائل للاخضرار .

الموجات فوق البنفسجية

تقع منطقة تسمى بفوق البنفسجية من الطيف فيما بعد حد الأطوال الموجية القصيرة (البنفسجى) لحساسية العين البشرية . ويمكن استخدام نوع من مصادر الضوء فوق البنفسجى (يعرف « بالضوء الأسود ») فى إضاءة شاشات تحتوى على دهان فلورى : إذ يمتص الدهان الموجات فوق البنفسجية غير المرئية ثم يشع جزءًا من الطاقة على هيئة موجات تقع فى منطقة الطيف المرئى . **والأشعة فوق البنفسجية القريبة** تمتص بشدة فى حزام الأوزون الموجود فى جو الأرض . أما **الأشعة فوق البنفسجية البعيدة** ، حيث تقترب من $\lambda = 10\ nm$ فتتراكب مع طيف أشعة إكس (أو الأشعة السينية) . وتعتبر الأنواع الشائعة من الزجاج معتمة بالنسبة لمعظم طيف الأشعة فوق البنفسجية .

أشعة إكس (أو الأشعة السينية)

عندما يقذف تيار - ذو طاقة عالية - من الإلكترونات نحو لوح معدنى داخل أنبوبة مفرغة فإن هذا يشكل طريقة من طرق توليد أشعة إكس . والأطوال الموجية النموذجية لهذه الموجات لها نفس حجم أو حتى أقل من قطر ذرة منفردة ؛ أو نحو 0.1 nm .



يعتبر استعمال أشعة إكس فى التشخيص الطبى من أكثر تطبيقاتها شيوعًا . . ويستخدم لهذا الغرض جهاز كالمبين فى الصورة .

وأشعة إكس لها مقدرة عالية على النفاذ من المواد الرخوة كاللحم . ويتراكب معظم طيف أشعة إكس أو الأشعة السينية مع أشعة جاما ويختلف الاثنان في أسلوب تولدهما . وسندرس أشعة إكس أو الأشعة السينية بتفصيل أكبر في الفصل السابع والعشرين .

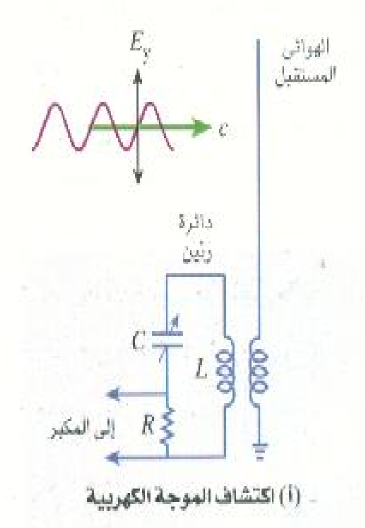
أشعة جاما

لهذه الأشعة أقصر أطوال الموجات الكهرومغناطيسية على الإطلاق . فهي تشمل موجات يصل طولها إلى أبعاد تقارب نصف قطر **نواة** الذرة أو 10^{-15} m وتعتبر التغيرات التلقائية في تركيب أنوية معينة (النشاط الإشعاعي) والأشعة الكونية القادمة من الفضاء الخارجي من أهم مصادر أشعة جاما ، ونقدم في الفصل الثامن والعشرين دراسة وافية لأشعة جاما .

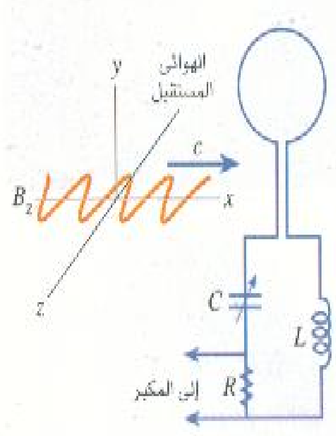
يلاحظ أن الطيف الكهرومغناطيسي يمتد ليغطي موجات تتراوح أطوالها بين ما يزيد على 10^{6} m وما هو أقل من 10^{-15} m . وعلى الرغم من أن كل هذه الموجات كهرومغناطيسية إلا أنها تختلف من حيث تفاعلها مع المادة . وسيخصص ما تبقى من الكتاب لدراسة الجوانب المتنوعة لهذا الموضوع .

22-4 استقبال موجات اللاسلكي (أو الراديو)

صممت أجهزة التليفزيون والراديو بحيث تكون أجهزة حساسة لالتقاط الموجات الكهرومغناطيسية في مدى الموجات اللاسلكية ـ موجات الراديو ـ . وعلى الرغم من أننا لن نناقش تركيب هذه الأجهزة بالتفصيل إلا أننا سنتعرف على الكيفية التي تلتقط بها الموجات اللاسلكية وتتناغم معها .



(أ) اكتشاف الموجة الكهربية



(ب) اكتشاف الموجة المغناطيسية

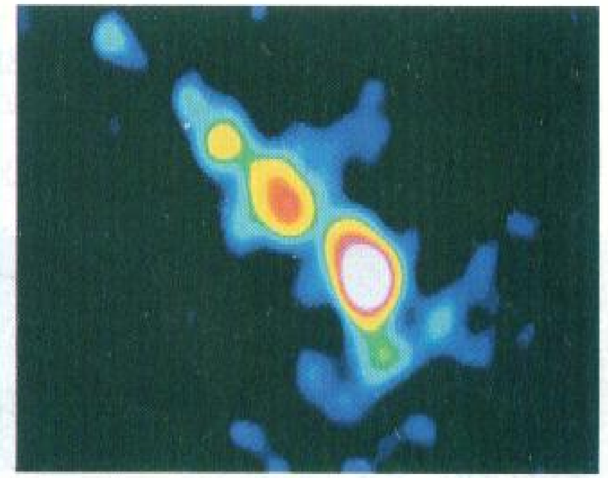
شكل 9-22:
يمثل الشكل طريقتين لاكتشاف موجات الراديو : (أ) اكتشاف الموجة الكهربية ، (ب) اكتشاف الموجة المغناطيسية .

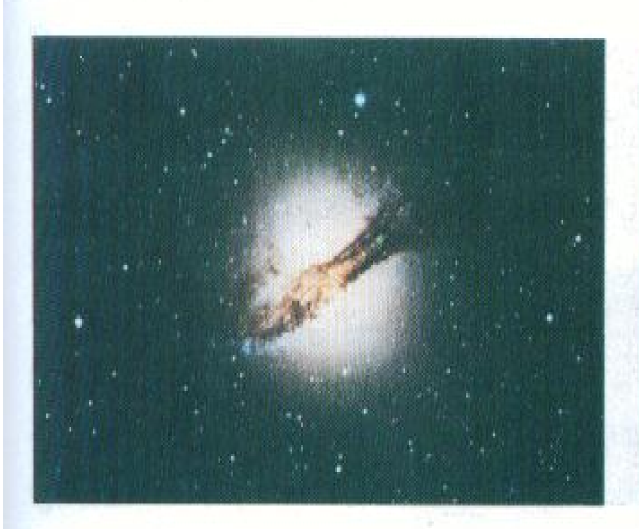
والموجة الكهرومغناطيسية يمكن الكشف عنها والتقاطها إما بواسطة جزئها الكهربي أو المغناطيسي . ولكي نلتقط الجزء الخاص بالمجال الكهربي فلا نحتاج سوى لقطعة طويلة من السلك (تسمى **هوائي الاستقبال**) في مسار تلك الموجات وإذا رجعنا إلى الشكل 9-22 (أ) فسنرى أن المجال الكهربي يجعل الشحنات تهتز في الهوائي . وعندما يكون $\mathbf{E}_y$ موجبًا ، فإن قمة الهوائي تكون موجبة . ثم تنعكس قطبية الهوائي في اللحظة التالية مباشرة ، عندما ينعكس اتجاه متجه المجال الكهربي في الموجة . ويجعل هذا التأثير المتكرر الشحنة تسري إلى أعلى وإلى أسفل الهوائي بصورة تعتمد جيبيًا على الزمن . وخلال هذه العملية ، يستحث التيار المتغير جهدًا مهتزًا في دائرة RLC مرتبطة بالهوائي بواسطة محاثة متبادلة . فإذا ضبطت الدائرة RLC بشكل صحيح فإن الدائرة ترن مع تردد موجة الراديو القادمة إليها . وسنقوم بإيضاح هذه النقطة .

إن لكل محطة إذاعة أو تليفزيون التردد المخصص لها ، حيث تقوم ببث الموجات عند ذلك التردد فقط . وبما أن الموجات القادمة من العديد من المحطات تسقط في نفس الوقت على الهوائي ، فإنه لابد من وجود وسيلة تستخدم لالتقاط الموجة الصادرة من المحطة المطلوبة فقط . وإذا رجعت إلى الشكل 9-22 لوجدت أن المكثف قد رسم سهم خلاله مشيرًا بذلك إلى أن هذا المكثف متغير السعة وعلينا تذكر أن دائرة LRC المتصلة

على التوالى تتميز بوجود تردد رنينى f_r يعتمد على كل من L و C : $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$ وعند تغيير C فإن التردد الذى يحدث عنده الرنين يتغير . وتسمى عملية تغيير C **ضبط أوموالفة الدائرة** . فإذا تصادف أن f_r الخاصة بالدائرة تتطابق مع تردد الموجة القادمة فإن تيارًا مترددًا ذا قيمة قصوى i سيحدث فى الدائرة ، متسببًا بهذا فى جهد متردد ضخم iR عبر المقاوم R . ويصبح هذا الجهد المتردد هو الإشارة الداخلة إلى جهاز استقبال الراديو حيث يتم تكبيره بواسطة مراحل أخرى داخل جهاز الاستقبال . وعندما يكون الرنين « حادًا » (أى أن تيار الرنين يتميز بقمة ضيقة جدًا فى العلاقة بين التيار والتردد) . فإن اختيار إحدى محطات الإذاعة عن طريق موالفة الدائرة على تردد تلك المحطة يجعل الجهاز يتجاهل كل الترددات البعيدة عن الرنين والتى تصل إلى الهوائى .

ويمكن اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية أيضًا بواسطة مجالها المغناطيسى المتذبذب ، فحيث أن هذا المجال يتغير بسرعة فإن الموجة تستحث ق.د.ك. فى عروة كالمبينة فى الشكل 9-22 (ب)* . ويلاحظ أنه لابد من توجيه العروة بشكل صحيح بحيث يمر فيض المجال المغناطيسى من خلالها (ولهذا السبب نجد أن أجهزة الراديو الصغيرة يختلف استقبالها لمحطات الإذاعة تبعًا لاتجاهها) . ويصل الجهد المستحث فى عروة الهوائى إلى دائرة RLC حيث يطبق عليها . وتتم الموالفة أو الضبط بالطريقة الموصوفة آنفًا .





منظر للمجرة NGC 5128 كما نرى من خلال (أ) انبعاثات الضوء المرئى و (ب) انبعاثات أشعة إكس . لاحظ أن نفثات المادة التى يبينها تلسكوب أشعة إكس مختفية تمامًا فى الصورة الملتقطة للأشعة الضوئية المرئية . ويوضح هذا أن الفلكيين لابد وأن يفحصوا كل جزء من طيف الموجات الكهرومغناطيسية حتى يمكنهم الحصول على أقصى قدر من المعلومات حول كوننا .

وقد يتساءل شخص ما ، لماذا لا يتم اكتشاف كل الموجات بما فى ذلك الضوء وأشعة إكس بأجهزة على غرار الراديو . والإجابة غاية فى البساطة أن الموجات ذات الترددات العالية جدًا تتطلب دوائر RLC رنينية يستحيل بناؤها تمامًا . فتردد الرنين ـ كما نعلم ـ لدائرة ما هو $1/2\pi\sqrt{LC}$. ولكى نجعل هذا التردد عاليًا جدًا لابد من أن يكون كل من L و C صغيرًا جدًا . أما فى حالة الموجات تحت الحمراء والموجات الضوئية وأشعة إكس ، فإن مجرد وضع سلكين جنبًا إلى جنب يجلب قيمًا للسعة C والمحاثة L كبيرة جدًا . وسوف نرى فى فصول قادمة أنه تلزم دائرة ذات أحجام ذرية لاكتشاف هذه

* تلتف العروة ـ عمليًا ـ على قضيب من مادة فرومغناطيسية مكونة ملفًا .

الموجات . وسوف نكتشف أن الذرات والجزيئات المنفردة تصبح فعليًا هي الدوائر الرنينية المستخدمة في اكتشاف موجات كهرومغناطيسية ذات ترددات مرتفعة جدًا .

22-5 سرعة الموجات الكهرومغناطيسية

الآن ، وقد استوعبنا الكثير من الصفات النوعية للموجات الكهرومغناطيسية ، فقد جاء الدور على الإتيان بتعبير رياضي لتحديد سرعتها . وسوف نستخدم طريقة تعتمد على حقيقة أشار إليها أينشتين بوضوح لأول مرة في نظريته للنسبية ، وهي حقيقة سنتناولها بالدراسة المفصلة في الفصل السادس والعشرين : **السرعات النسبية فقط هي التي يمكن تعيينها** . فيقال لجسم ما أنه ساكن بالنسبة لجسم آخر ولكنه لا يكون ساكنًا بأى معنى مطلق آخر .

فحين تقرأ هذا الكلام ، مثلاً ، فقد تكون ساكنًا بالنسبة للأرض ، ولكن الأرض نفسها في حركة بالنسبة للشمس وبالتالي فأنت أيضًا كذلك . وبالإضافة إلى هذا فالشمس في حركة داخل مجرتنا ، درب التبانة (أو الطريق اللبنية) ، ومجرتنا في حركة بالنسبة للمجرات الأخرى السابحة في الكون . وقولنا أن شيئًا ما في حالة سكون بالنسبة لشيء آخر قد يكون ذا معنى ولكننا لا نستطيع القول عن أى الجسمين في حالة سكون مطلق أو بأية طريقة لا تشتمل على مقارنة .

دعنا الآن نناقش القوة التي تتعرض لها شحنة q تتحرك بسرعة مقدارها v في اتجاه متعامد مع مجال مغناطيسي مقداره $B_\perp$ وذلك في إطار الحقيقة السابقة . لقد وجدنا في الفصل التاسع عشر أن القوة التي تتعرض لها الشحنة هي :

$$F = qv\,B_\perp$$

ولكن من الذى يستطيع القول بأن الشحنة ليست ساكنة وأن المجال - بدلاً منها - هو الذي يتحرك ؟ فالواقع أننا لا نلاحظ في النهاية إلا الحركة النسبية . ومن ثم فتجربتنا قد تفسر بطريقة بديلة على النحو التالي : إن مجالاً $\mathbf{B}$ يتحرك بسرعة v عموديًا على خطوط المجال مرورًا بشحنة مقدارها q سيؤثر عليها بقوة مقدارها $F = qv\,B_\perp$.



الفيزيائيون يعملون : بول هوروفيتس جامعة هارفارد

لقد شغلت تمامًا خلال العقد الأخير بمسالة البحث عن ذكاء خارج نطاق الكرة الأرضية وذلك بالتنصت بواسطة تلسكوب لاسلكي جبار متصل بطبق مزود بأكثر معدات التنصت تعقيدًا لالتقاط أية إشارات لاسلكية صادرة عن حضارات متقدمة ، وعلى الرغم من أن هذا النوع من النشاط كان يعد في وقت سابق شيئًا « غير علمي » إلا أن الاكتشافات الحديثة في مجال علم الفلك والمجالات المرتبطة به تؤيد فكرة وجود العديد من الكيانات التي تضم صورة من صور الحياة . وتشير بيانات الأشعة تحت

الحمراء والمرئية على وجه الخصوص ـ للأقراص الكوكبية ، إلى وجود نظم كوكبية عادية فى كوننا ، كما تشير إلى ذلك أيضاً الأدلة غير المباشرة على وجود أجرام كوكبية تسمى الأقزام البنية . وقد وجدت فى نفس الوقت مكونات الحياة فى النيازك وسحب ما بين النجوم الغازية الباردة وكذا فى البقايا المتخلفة من خلال التجارب العملية التى تتعرض فيها مكونات التربة البدائية للحرارة وضوء الشمس والتفريغ الكهربى . وعلى هذا فلدينا كميات كبيرة من المادة الخام والبيئات الصالحة للحياة . ولسنا نحن البشر إلا لمحة ضئيلة من الحياة على كوكب متوسط تقريبًا ، يدور حول نجم متوسط ، وهو واحد من 400 بليون نجم فى مجرتنا ، التى هى واحدة من مائة بليون مجرة فى الكون . وفى ضوء هذا قد يكون من الوقاحة أن نظن أن الحياة لا توجد إلا فوق الأرض .

إن أقرب نجم إلينا يقع على بعد أربعة ملايين سنة ضوئية ، أما مجرتنا فتمتد إلى نحو مائة ألف سنة ضوئية . هل الاتصال بحضارات أخرى يكون ممكنًا حتى فى ظل هذه المسافات التى تجعل العقل ينكمش ويجفل ؟ إن الإجابة المذهلة هى نعم فباستخدام تكنولوجيا الموجات اللاسلكية الدقيقة (الميكروويف) فى علم الفلك ، المتاحة حاليًا ، يمكن للأرض أن تتصل بكوكب شقيق لها فى أى بقعة من مجرتنا وهذا بالطبع أمر مناقض تمامًا للجهود المطلوبة للانتقال إلى نظام نجمى آخر حيث يتطلب الأمر استهلاك موارد الطاقة المتاحة بالأرض لمئات السنين لمجرد إجراء رحلة إلى أقرب نجم ثم العودة منه .

إذن ، إذا كانت هناك حياة متقدمة علينا وتوجد فى نجوم أخرى فلماذا لم نسمع شيئًا منهم إذا كانت وسائل الاتصال ممكنة ؟ يحتمل أننا لم ننظر فى الحقيقة إلى الأمر كما يجب . فقد كانت هناك بحوث متناثرة فى مجالات شتى ولا يكاد تمويلها يسد الرمق : لقد نحينا جانبًا إمكانية أن السماء مليئة بنفايات على هيئة أجهزة إرسال توجه أشعة قوية فى طريقنا . ولكى نؤدى العمل على الوجه الأكمل نحو مسح دقيق للسماوات بحثًا عن إرسال متعمد من « فنار » لاسلكى يكون خافتًا للغاية لدى وصوله إلينا ، لابد لنا من معدات لمعالجة الإشارات وهى معدات معقدة لم تأخذ فى الظهور إلا مؤخرًا بفضل ثورة السليكون . وقد بدأت البحث نظم للاستقبال بها ملايين القنوات فى معملنا فى هارفارد وفى أماكن أخرى فى العالم ، ويتوقع الكثيرون منا أن تنجح هذه الجهود خلال قرن من الزمان .

وسيكون اكتشاف إشارات من حضارة أخرى هو بمثابة نهاية العزلة الثقافية لكوكب الأرض إذا شئنا التعبير بعمق ؛ بل إن هذا الحدث سيكون هو الأكبر فى تاريخ البشرية . إن مجرد اكتشاف مثل هذه الإشارة سيجيب على السؤال المهم : « هل نحن وحدنا ؟ » أما المعلومات التى ستتدفق عبر الفنار الذى يعمل بين النجوم بمثابة « إنسيكلوبيديا جلاكتيكا » أو دائرة معارف مجرية ، تحتوى على علوم وفنون وتاريخ وآداب خارج نطاق أقصى أمانينا تطرفًا . إن معداتنا هى الجيل الأول الذى يقدر على عمل الاتصال بشكل واقعى . ولا أستطيع تخيل استكشافات أكثر إثارة مما نفعله ولذا أكرس كل طاقتى فى أداء هذه التجارب .

ولقد أحببت دائمًا ، منذ ذكرياتى المبكرة ، اللعب بالأدوات المختلفة مترسمًا خطى أخى الأكبر . وكان أغلب ما يشدنا هو الإلكترونيات ، ثم أصبحنا من جيل الصواريخ الصغير فى عصر « سبوتنيك » . وقد درس أخى الهندسة الكهربائية فى معهد MIT (ويمتلك الآن شركة للاتصالات بالتكنولوجيا المتقدمة) ، وإن كان قد نصحنى باختيار الفيزياء كتخصص رئيسى بدلاً من تخصصه هو ، لأن الفيزياء موضوع كونى . وقد أضاف والداى أنه على أن أدرس فى هارفارد ؛ حيث توجهت وحيث استقر بى المقام . وقد كانت دراسة العلوم التجريبية فى جامعى أكاديمية شيئًا بديعًا للغاية حيث أتيح لنا أن نفعل ما يعن لنا إلى درجة إجراء تجارب تكاد تكون معتوهة . ولعلى أصنف كمعتوه أو غريب الأطوار نظرًا لقيامى بمجموعة من التجارب التى يضمها خيط واحد وهى أنها بعيدة عن المسار الدراسى ، مثل البحث : عن زلازل فوق النجوم النابضة وفى أنواع مبتكرة من الميكروسكوبات (المجاهر) التى تعمل بأشعة إكس وبالبروتونات وفى تركيب الآلات الدورانية البكتيرية فى إشيريشيا كولاى (نوع من البكتيريا) والبحث عن ذرات فائقة الوزن ، وبالطبع عن الهدف العلمى الرئيسى وهو البحث عن ذكاء خارج نطاق الكرة الأرضية (SETI) .

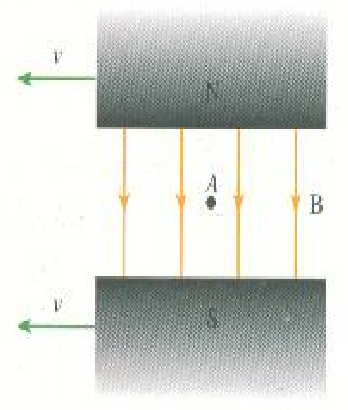
إننى أستمتع بإجراء تجارب تتطلب قدرًا كبيرًا من بناء أجهزة إلكترونية حسب طلبى ، لأننى أحب دائمًا أن أبنى أشياء . وإن كنت أجد أن مجتمع الفيزيائيين مثير للغاية وسعيد جدًا لأننى أتبعت نصيحة أخى . وعندما أقوم بعمل هندسى فإننى أجد نفسى « أفكر كفيزيائى » . وقد لا يبدو غريبًا ، حقيقة أن أفضل مصممى الدوائر الإلكترونية هم الفيزيائيون « الفاشلون » ! ولا أتردد فى إسداء النصيحة التالية : إذا لم تكن متأكدًا مما تريد كخط لبناء مستقبلك وظننت أن الأمور قد ترسو على الفيزياء فتخصص فى الفيزياء . إنها ستكون أعظم إعداد لك لكى تقوم بعمل أشياء أخرى غير الفيزياء .

وبما أن القوة المؤثرة على وحدة الشحنات F/q تعرّف على أنها مقدار المجال الكهربى ، فيمكننا أن نعيد صياغة هذا على النحو التالى :

عندما يتحرك مجال مغناطيسى $\mathbf{B}$ بسرعة مقدارها v عموديًا على خطوط المجال فإنه يولد مجالاً كهربيًا مقداره :

$$E = vB \tag{22-2}$$

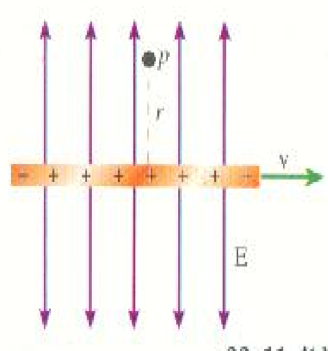
فى المنطقة التى يخترقها .



شكل 10–22:
يتحرك المجال المغناطيسى B (المبين بالخطوط الملونة الرأسية) مع قطبى المغناطيس عبر النقطة A بسرعة مقدارها v وتولد هذه الحركة مجالاً كهربيًا $E = Bv$ يتجه إلى داخل الصفحة .

ولكى نوضح هذا دعنا ندرس الحالة المبينة فى الشكل 10–22 ، حيث يتحرك قطبا المغناطيس بسرعة مقدارها v فى الاتجاه المبين . وهما بذلك يحملان معهما خطوط المجال المغناطيسى ، أى أن لدينا فى هذه المنطقة مجالاً مغناطيسيًا متحركًا هو $\mathbf{B}$ ، ومن ثم سيوجد فى منطقة مثل A مجال كهربى مقداره $E = vB$. ولابد أن تستطيع إثبات أن اتجاه E يكون إلى داخل الصفحة* .

ويبدو من مسيرة هذا الاستدلال المنطقى أن المجال المغناطيسى المنطلق من هوائى جهاز إرسال لاسلكى لابد أن يولد مجالاً كهربيًا فى المنطقة التى يخترقها . وأنه عند نقطة معينة ، لابد للمجال الكهربى أن يرتبط بسرعة تحرك موجة المجال المغناطيسى ومقدار ذلك المجال بالعلاقة $E = vB$ وهنا يثور السؤال عما إذا كان **المجال الكهربى** المتحرك ، قادرًا على توليد **مجال مغناطيسى** أم لا . إن الإجابة عن هذا السؤال ستفضى بنا إلى نتيجة مهمة للغاية .



شكل 11–22:
يحمل السلك المشحون المتحرك خطوط المجال الكهربى معه عبر النقطة P .

افترض أن لديك سلكًا طويلاً منتظم الشحنة كما هو مبين فى الشكل 11–22 . وأن السلك يتحرك نحو اليمين فى اتجاه طوله بسرعة مقدارها v ، هى نفس سرعة خطوط المجال الكهربى الصادر عنه والتى تتحرك عبر نقطة P . ونعلم أن السلك المشحون المتحرك يشكل تيارًا بطول السلك ؛ يتعين مقداره إذا علمنا كمية الشحنة التى تمر عبر P فى الثانية الواحدة . فإذا فرضنا أن بالسلك شحنة مقدارها ρ فى وحدة أطواله (لقد استخدمنا ρ للتعبير عن الكثافة الخطية للشحنة بدلاً من λ التى استخدمناها فى الفصل السادس عشر حتى نتجنب اللبس مع الرمز λ المستخدم للدلالة على الطول الموجى) . وأن طول السلك الذى يمر بالنقطة P فى زمن قدره t هو vt ، فإن

* تلميح : ضع شحنة موجبة عند النقطة A وتذكر أن الحركة نسبية .

$$\text{التيار} = \frac{P \text{ الشحنة المارة بالنقطة}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{\rho v t}{t} = \rho v$$

أى أن مقدار التيار الذى يشكله السلك المشحون المتحرك هو ρv .

على أن التيار ينتج مجالاً مغناطيسيًا ، لذلك فالسلك المتحرك يكون محاطًا بمجال مغناطيسى (عليك إثبات أن هذا المجال يحيط بالسلك ويتجه إلى خارج الصفحة فى المنطقة الواقعة فوق السلك) . وقد درسنا فى الفصل التاسع عشر أن المجال المغناطيسى الذى ينشؤه تيار I يمر فى سلك طويل مستقيم هو $B = \mu_0 I/2\pi r$ (المعادلة 9-19) . فإذا طبقنا هذه النتيجة على الحالة الراهنة ، لوجدنا أن المجال المغناطيسى عند النقطة P هو

$$B = \frac{\mu_0 \rho v}{2\pi r} \qquad (22\text{-}3)$$

ونأمل الآن فى ربط هذه النتيجة بالمجال الكهربى خارج السلك عند النقطة P .
نعلم من المعادلة (7-16) أن المجال الكهربى خارج سلك مستقيم ، طويل منتظم الشحنة هو

$$E = \frac{\rho}{2\pi \epsilon_0 r} \qquad (22\text{-}4)$$

حيث ϵ_0 هى سماحية الفراغ ومقدارها $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$. سنلغى الآن ρ من المعادلتين (3-22) و (4-22) والنتيجة هى :

$$B = \epsilon_0 \mu_0 v E \qquad (22\text{-}5)$$

ويمكن مقارنة هذه المعادلة بالعلاقة السابقة :

$$B = \frac{E}{v} \qquad (22\text{-}6)$$

التى حصلنا عليها من قبل بالنسبة لمجال مغناطيسى متحرك .

وعلى الرغم من أن هذه تعتبر حالة خاصة جدًا حيث يتحرك سلك مشحون بحيث يولد مجالاً مغناطيسيًا ، إلا أنها حالة نموذجية . إن الشحنات المتحركة تولد مجالاً مغناطيسيًا ، ولكن الشحنات المتحركة تكون مصحوبة بمجال كهربى يتحرك معها دائمًا . والمجال المغناطيسى الذى تولده حركة الشحنات يمكن أن يعزى أيضًا إلى حركة المجال الكهربى وعلى هذا نستطيع أن نخرج بالنتيجة التالية :

المجال الكهربى **E** المتحرك بسرعة مقدارها v عموديًا على خطوط المجال ، يولد مجالاً مغناطيسيًا مقداره $B = \epsilon_0 \mu_0 v E$ فى المنطقة التى يخترقها .

لنعد الآن إلى الشكل 6-22 الذى يظهر فيه مجال مغناطيسى وآخر كهربى متولدين بواسطة هوائى . يندفع المجالان بامتداد خط الانتشار بسرعة مقدارها v ولنأخذ أولاً المجال المغناطيسى وهو يمر عبر نقطة ما فى الفضاء إنه يولد مجالاً كهربيًا عند تلك النقطة . وبالمثل فإن المجال الكهربى المنبعث من الهوائى يمر هو الآخر عبر نفس النقطة ويولد هناك مجالاً مغناطيسيًا .

ولو أنك تمعنت فى الموقف الذى يصوره الشكل 6-22 لرأيت أن المجال الكهربى المبين يتخذ نفس اتجاه المجال الكهربى الذى يولده المجال المغناطيسى المتحرك . وإلى جانب ذلك ، فالمجال المغناطيسى المبين له نفس اتجاه المجال المغناطيسى الذى يولده المجال الكهربى المتحرك . ولهذا نميل إلى القول بأن المجالين الكهربى والمغناطيسى الموجودين فى موجة كهرومغناطيسية يعيدان توليد بعضهما البعض أثناء حركة الموجة خلال الفضاء . دعنا نطرح هذا الفرض ونرى إلى أين يقودنا .

افترض أن المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية يولد كل منهما الآخر أثناء حركة الموجة خلال الفضاء . وعلى هذا تنطبق كل من المعادلتين 5-22 و 6-22 على الموجة . وإذا كان الأمر كذلك فإن B و E لابد أن يرتبطا بنفس الطريقة فى المعادلتين ، ومن ثم يكون ثابتا التناسب بين E و B هما نفس الشيء . إذن

$$\epsilon_0 \mu_0 v = \frac{1}{v}$$

وبحل هذه المعادلة لإيجاد قيمة v ، وهى سرعة الموجة الكهرومغناطيسية فى الفراغ ، نجد أن

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \qquad (22\text{-}7)$$

وهى نفس القيمة التى حصل عليها ماكسويل كما سبق ووصفنا فى القسم 1-22 . ونستنتج إذن مثلما فعل ماكسويل أن :

تنتقل كل الموجات الكهرومغناطيسية خلال الفراغ بالسرعة $c = 2.998 \times 10^8$ m/s ، وأن الضوء أحد صور الموجة الكهرومغناطيسية .

واستطرادًا للموضوع فإن المعادلة 6-22 تعطينا العلاقة بين B و E فى موجة كهرومغناطيسية تنتقل خلال الفراغ :

$$E = cB \qquad (22\text{-}8)$$

مثال 1-22

عندما تمر موجة كهرومغناطيسية ما عبر نقطة فى الفضاء فإن مجالها الكهربى يتغير كالآتى :

$$E = E_0 \sin 2\pi ft$$

حيث $E_0 = 0.0042$ V/m . ما هى سعة المجال المغناطيسى فى هذه الموجة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة المجال المغناطيسى فى الموجة ؟

الإجابة : يوضح الحل المفصل لمعادلة ماكسويل أن المجالين يكونان متفقين فى الطور عند نقطة تبعد كثيرًا عن مصدر الموجة . ولهذا فإن

$$B = B_0 \sin 2\pi ft$$

سؤال : وهل هناك علاقة ثابتة بين E و B فى موجة كهرومغناطيسية ؟

الإجابة : نعم $E/c = B$.

الحل والمناقشة : سنستخدم العلاقة $E/c = B$ فى حالة سعتى المجالين E_0 و B_0 .

$$B_0 = \frac{0.0042 \text{ V/m}}{3\times 10^8 \text{ m/s}} = 1.4\times 10^{-11} \text{ T}$$

لاحظ مدى ضآلة المجال المغناطيسى فى الموجة الكهرومغناطيسية . إن صغر مقدار المجال B فى المجالات الكهرومغناطيسية هو السبب الرئيسى فى أن المجالات المغناطيسية المستحثة لم يمكن رصدها فى الفترة التى وضع فيها ماكسويل نظريته .

عليك إثبات صحة الوحدات التى ظهرت فى الحل .

مثال 22-2

افترض أن الموجة فى المثال السابق كان ترددها 5×10^8 Hz . وعندما تمر هذه الموجة عبر عروة هوائى كالمبين فى الشكل 9-22 (ب) فإن المجال المغناطيسى يستحث ق.د.ك فى العروة . وللعروة لفة واحدة مساحتها 25 cm^2 وتتعامد مع المجال المغناطيسى للموجة . ما هى القيمة المتوسطة لـ ق.د.ك المستحثة فى العروة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يتناول ق.د.ك المستحثة ؟

الإجابة : إنه قانون فاراداى للحث .

سؤال : ما هى المعلومات التى يتطلبها هذا المبدأ ؟

الإجابة : ينص قانون فاراداى (المعادلة 3-20) على أن $\overline{\text{emf}} = \Delta\Phi_B / \Delta t$. وفى هذه الحالة تكون مساحة العروة متعامدة مع **B** ؛ ولهذا فإن الفيض فى أية لحظة هو ببساطة $\Phi_B = BA$. وبما أن A مقدار ثابت فإن $\Phi_B = (\Delta B)A$ و

$$\overline{\text{emf}} = \overline{\frac{\Delta B}{\Delta t}} A$$

سؤال : كيف أستطيع تقدير قيمة معدل تغير الفيض ؟

الإجابة : لقد حصلنا على سعة B من المثال 1-22 ، وتعلم أن المجال المغناطيسى يتغير من B_0 إلى الصفر خلال 1/4 دورة . وعلى الرغم من أن $\Delta B/\Delta t$ ليس ثابتًا خلال هذه الفترة إلا أننا نستطيع الحصول على ق.د.ك المتوسطة باعتباره ثابتًا .

الحل والمناقشة : نستطيع من قيمة التردد $f = 5\times 10^8$ Hz أن نجد زمن ربع دورة .

$$\frac{T}{4} = \frac{1}{4f} = \frac{1}{4(5\times 10^8 \text{ s}^{-1})} = 5\times 10^{-10} \text{ s}$$

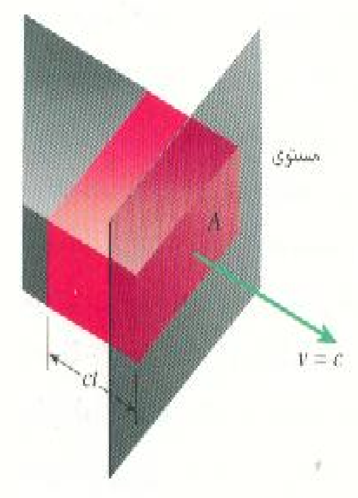
ومتوسط معدل تغير B خلال هذه الفترة الزمنية هو

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{B_0 - 0}{T/4} = \frac{1.4\times10^{-11}\text{T}}{5\times10^{-10}\text{ s}} = 2.8\times10^{-2}\text{ T/s}$$

و ق.د.ك المستحثة المتوسطة هى :

$$\overline{\text{emf}} = \frac{\overline{\Delta B}}{\Delta t}A = (2.8\times10^{-2}\text{ T/s})(25\times10^{-4}\text{ m}^2) = 7.0\times10^{-5}\text{ V}$$

22-6 الطاقة المحمولة بالموجات الكهرومغناطيسية



شكل 12-22: يمر حجم مقداره Act من حزمة الموجات عبر المستوى فى زمن مقداره t .

لقد عرفنا أن الموجات الكهرومغناطيسية تتكون من مجالين متحركين هما الكهربى والمغناطيسى ولما كان هذان المجالان يحتويان على طاقة ، لذا فالموجات لابد أن تحمل طاقة عبر الفضاء والموجات الكهرومغناطيسية القادمة من الشمس ، مثلاً ، تدفئ الأرض وتمد النباتات بالطاقة اللازمة للنمو . والموجات التى تبثها محطة إرسال تليفزيونى بعيدة ، تحمل الطاقة التى توصل الصورة والصوت إلى أجهزة التليفزيون لدينا . دعنا نقوم بحساب مقدار الطاقة المنقولة إلى سطح ما ، تسقط عليه موجة كهرومغناطيسية .

لاشك أننا نذكر من القسم 12-17 أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم من مجال كهربى مقداره E فى الفراغ هى $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$. كما أننا أوضحنا فى القسم 7-20 أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم من مجال مغناطيسى مقداره B هى $B^2/2\mu_0$ وسننظر فى حالة حزمة من الإشعاع الكهرومغناطيسى المبين فى الشكل . إن المساحة الطرفية للحزمة هى A وتنتقل إلى اليمين بسرعة الضوء c . وحيث أن الحزمة تنتقل مسافة مقدارها ct خلال الفترة الزمنية t فإن مسافة مقدارها ct من طول الموجة يخترق المستوى فى هذه الفترة . ومن ثم يكون حجم الحزمة التى تخترق المستوى فى فترة زمنية مقدارها t هو Act وقد أشرنا إلى هذا الحجم بالجزء المظلل فى الشكل .

خلافات فى الفيزياء : طبيعة الضوء

يعتبر الضوء من أكثر الظواهر الفيزيائية التى تشعر بها حواسنا ، أهمية بل وقد يكون من أكثرها إثارة للحيرة . إن إحساسنا بالضوء هو الذى يمدنا بمعرفة شكل وحجم ولون العالم المحيط بنا بدقة كبيرة وقد لاحظ البشر عبر تاريخهم الطويل أن الضوء يصدر عن الشمس والنار والأجسام الساخنة والبرق . وخلق الضوء يظهر فى قصص التكوين فى الديانات الرئيسية . وعلى الرغم من أن الضوء هو الذى يتيح لنا رؤية الأشياء إلا أننا لا نستطيع رؤية الضوء نفسه . أى أننا لا نستطيع أن نحس بالطبيعة الفيزيائية للضوء بشكل مباشر . فهل الضوء مكون من نوع من المادة ؟ وهل هو مكون من تيار من الجسيمات أم هو نوع من الذبذبات أو الموجات ؟ وما هى السرعة التى ينتقل بها ؟ وكيف نتلقى صورة جسم ما ليس بيننا وبينه أى اتصال فيزيائى ؟ إن كلا من العملية التى نستطيع من خلالها الرؤية وطبيعة الضوء ، ظاهرتان كانتا محل تفكير البشر قبل بدء العلوم الحديثة بوقت طويل جداً .

لقد تم فهم عملية تكون الصور بواسطة العدسات بحلول نهاية القرن السابع عشر . وتم الاتفاق على أن الرؤية هي بمثابة العملية التي تنطوي على قيام عدسة العين بتجميع صورة الضوء الساقط على الشبكية . وقد رسخ عالم الفلك الدانماركي رومر - وهو معاصر لنيوتن - حقيقة أن سرعة الضوء ، وإن كانت كبيرة جدًا - إلا أنها محددة وذلك بعد قيامه بإثبات ذلك بالتجربة ، وإن كانت القيمة الحالية لسرعة الضوء أكبر بنحو خمسين بالمائة من النتيجة الأصلية التي حصل عليها رومر . وقد ثبت أن أصعب سؤال مطروح هو **ما هو الضوء** ؟ وهل يتكون من تيار من جسيمات أم من موجات من نوع ما ؟ وعبر العديد من السنين ظهرت آراء كثيرة تعضد أيًا من هذين الرأيين المتنافسين .

دعنا نفحص أولاً ما هو المقصود بكلمة **جسيم** وكلمة **موجة** . يشير هذان المصطلحان من ناحية عامة إلى مفهومين متعاكسين من حيث المبدأ . فالجسيمات عادة ما تكون محددة بموضع في لحظة ما ، مما يعني أنها إما أن تكون كنقط مثالية أو أن لها حدود معروفة ومن ثم تكون كميات تحركها وطاقاتها محددة . أما الموجات - على الجانب الآخر - فإنها تمثل حركة متناسقة تمتد عبر مسافات كبيرة . وتعتمد طاقة الموجة على سعة الموجة ؛ وهي ليست محددة بموضوع ولكنها خاصية للموجة بأكملها .

وقد رفض نيوتن النموذج الموجي للضوء ؛ لأنه اعتبر الفضاء مجرد فراغ خاوٍ وليس به أية مادة لازمة لحمل ونشر الاهتزازات . أما الجسيمات ؛ على الجانب الآخر فتستطيع الحركة دون أية عوائق خلال الفراغ في خطوط مستقيمة . أما كون الجسيمات الضوئية لا يبدو عليها أي تأثير بالجاذبية ؛ فقد عزاه نيوتن إلى سرعتها الفائقة . وقد فسر نموذج الجسيمات قانون الانعكاس ، لأن الاتجاه الذي يسلكه شعاع ضوئي ساقط حين ينعكس على مرآة هو نفس الاتجاه الذي تتخذه كرة حين ترتد بمرونة من سطح ما ، أما الانكسار فقد فسره نيوتن على أنه التجاذب المؤثر على جسيمات الضوء من جانب جزيئات المادة الشفافة . عند مرور تلك الجسيمات داخل المادة . (والانكسار هو تغيير الاتجاه عندما ينتقل الضوء من وسط إلى آخر) . وتغير قوة التجاذب تلك من اتجاه الجسيم وذلك بزيادة مركبة سرعته العمودية على سطح المادة مما يجعل الجسيم ينحرف نحو العمود المقام على السطح . أما حقيقة أن الألوان المختلفة تنكسر بمقادير مختلفة فقد فسر بأن هناك جسيمات ذات ألوان مختلفة وتتفاوت في كتلها .

وقد صاغ عالم هولندي آخر معاصر لنيوتن وهو كريستيان هيجنز (1629 – 1695) النظرية الموجية للضوء . وقد وجد هيجنز أنه من الصعب تقبل السرعة المفترضة للجسيمات ، كما لاحظ أنه عند تقاطع حزمتين ضوئيتين ، فإن الضوء لا يظهر أية دلائل على التشتت نتيجة تصادم الجسيمات كما هو متوقع عند تقاطع تيارين من الجسيمات . وقد صاغ تفسيرًا هندسيًا (وهو مبدأ هيجنز) لشكل الموجات عند انتشارها عبر فتحات ومن حول حواف الحواجز ، وبذلك وصف ظاهرة الحيود بشكل صحيح . وقد فسرت نظرية هيجنز الانكسار على أساس **تباطؤ** الضوء عند دخوله إلى الوسط خلافًا لنموذج نيوتن . ولم تكن هناك وسيلة متاحة - للأسف - لقياس سرعة الضوء في مادة شفافة بحيث يمكن عندئذ الاختيار بين هاتين النظريتين المتنافستين . على أن نموذج نيوتن للجسيمات هو الذي ساد خلال القرن الثامن عشر نظرًا لسمعة نيوتن وتأثيره .

ثم قدم العالم الإنجليزي توماس يونج عام 1804 أول اختبار حاسم للنموذجين المتنافسين للضوء ، فقد أجرى تجربة (القسم 24-3) اتضح منها أن مصدرين نقطيين للضوء يمكن أن ينتجا نمطًا لشدة الضوء ذا توزيع مماثل تمامًا لمجموع شدتي موجتين متراكبتين وتوزيعهما ناتج عن تداخل الموجتين . وبما أن الجسيمات ليست لها خاصية تداخل السعات ، فإن نتائج يونج أثبتت أن للضوء - بالفعل - خواص موجية .

على أن هذه النتيجة لم يعترف بها إلا بعد نحو خمسة عشر عامًا عندما قام فيزيائي فرنسي هو أوجستين فرينل بصياغة النظرية الرياضية لتجربة يونج . وقد اقترحت نظرية فرينل أن الضوء عبارة عن موجات مستعرضة ، وقد عزز ذلك الملاحظات التي بينت أن الضوء يمكن استقطابه (1808 – 1815) . وقد كانت تلك الملاحظات تعارض هي الأخرى نموذج الجسيمات ، لأن حزمة الجسيمات ليس لها خاصية الاستقطاب طبقًا للنظرية الكلاسيكية . وأخيرًا تمكن الفيزيائي الفرنسي فيزو من إجراء

قياسات مباشرة لسرعة الضوء في الماء ، فوجد أن هذه السرعة أقل من سرعة الضوء في الهواء . وقد أيدت هذه النتائج - التي تعارض نموذج نيوتن للجسيمات مباشرة - نظرية هيجنز الموجية لتفسير الانكسار .

وإذ توافرت كل هذه الأدلة فقد كان منتظرًا أن تختفي الشكوك التي أحاطت بالطبيعة الموجية للضوء . على أن هذا لم يحدث ، فقد ظل هناك سؤال قائم وهو : « كيف ينتقل الضوء خلال الفراغ حيث لا مادة هناك تقوم بحمل الموجات ؟ » إن السرعة الهائلة للضوء تتطلب أن يكون الوسط المهتز جاسئًا للغاية وألا يشكل في الوقت ذاته أية مقاومة لمرور الكواكب من خلاله . ولم يستطع الإجابة عن **ماهية** الشيء المتموج حتى أولئك الذين وافقوا على قبول النموذج الموجي .

وكما رأينا في هذا الفصل ، فإن ماكسويل هو الذي قدم الإجابة على هذا السؤال الأخير من خلال نظريته عن المجالات الكهربية والمغناطيسية المهتزة . كما إنه تنبأ بوجود طيف كامل للموجات الكهرومغناطيسية التي يشكل الضوء جزءًا ضئيلا منه .

ولقد كان لا يزال ثابتًا في الأذهان أن هناك وسطًا (يقال له الأثير) لابد وأن يكون موجودًا . وأن خواص ذلك الوسط هي التي تحدد السرعة المطلقة للضوء . وقد حاول مايكلسون في ثمانينيات القرن (19) أن يعين سرعة الأرض عبر الأثير المحيط بها باستخدام مقياس التداخل الذي ابتكره (القسم 1-26) لقياس الفرق في سرعة الضوء والذي تنبأت به نظرية الأثير عندما تدور الأرض داخل مدارها وذلك في اتجاهين متعاكسين مرة كل ستة أشهر . ولكنه لم يستطع هو ومساعده مورلى أن يقيسا أي فرق في سرعة الضوء ، على الرغم من أن مقياس التداخل لديهما كان ذا حساسية كافية لتعيين الفرق المتوقع وهو 36 mi/s . ودفعت هذه الحقيقة معظم الفيزيائيين إلى استنتاج أن الأثير شيء غير موجود على الإطلاق . وهكذا فقد بدا بانقضاء القرن التاسع عشر أن السؤال العريق حول طبيعة الضوء قد أجيب بشكل نهائي . وأن الضوء هو موجة غير مادية تتكون من مجال كهربي وآخر مغناطيسي يهتزان ، وأن الموجة تنتقل عبر الفراغ دون الحاجة إلى وجود جسم مادي لنقلها .

إلا أن الطبيعة - على ما يبدو - تدخر دائمًا مفاجآت محيرة تظهر في اللحظة التي نظن فيها أننا وصلنا إلى الحل المريح في النهاية ، فقد شهدت السنوات الأخيرة من القرن التاسع عشر والسنوات الأولى من القرن العشرين تحديات تتصدى لفهمنا لطبيعة الضوء . واتضح أن طيف الضوء الذي تشعه الأجسام الساخنة (القسم 7-26) لا يمكن تفسيره من خلال النموذج الموجي ، الذي لم يتمكن أيضًا من تفسير الأثر الكهروضوئي (القسم 8-26) حيث تنطلق الإلكترونات من أسطح الفلزات إذا تعرضت تلك الأسطح للضوء . ولم تفسر هاتان الظاهرتان بشكل دقيق وأنيق (على يدى بلانك ومن بعده أينشتين) إلا عند اعتبار الضوء مكونًا من تيار من الجسيمات التي أطلق عليها **فوتونات** والتي تنتقل بسرعة الضوء وتحمل مقدارًا من الطاقة يتناسب مع تردد الضوء . ثم لاحظ كومتون في عشرينيات القرن العشرين أنه عندما ترتطم أشعة إكس بالإلكترونات فإنها تتبادل معها الطاقة وكمية التحرك كما لو كانت تلك الأشعة بمثابة جسيمات تتصادم بمرونة مع الإلكترونات . (القسم 9-26) .

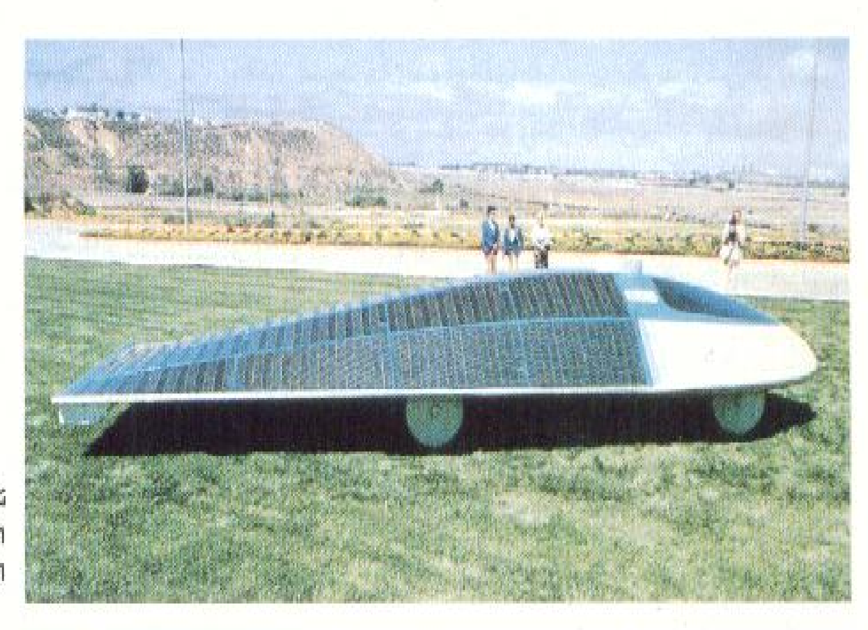
وكما لو كانت التطورات السالفة غير كافية لإثارة الارتباك ، فقد قام الفيزيائي الفرنسي دى برولى بوضع نظرية مفادها أن الجسيمات المادية لابد وأن تصاحبها « موجة مادية » يتناسب طولها الموجي عكسيًا مع كمية تحرك الجسيم (القسم 10-26) فإذا صحت هذه النظرية فإن الجسيمات المارة من خلال فتحات ضيقة لابد وأن تعاني من تأثيرات موجية مثل الحيود والتداخل . وقد شوهد حيود الإلكترونات بالفعل عام 1927 مما يؤيد تنبؤات دى برولى (القسم 10-26) . كما رصدت منذ ذلك الوقت تأثيرات موجية مصاحبة لحزم البروتونات والنيوترونات .

وهكذا نصل إلى الوضع الراهن الذي يتمتع فيه الضوء بطبيعة **ثنائية** : إذ يظهر طبيعة موجية في بعض التجارب وسلوكًا شبيهًا بسلوك الجسيمات في تجارب أخرى . ونفس الوضع قائم لتلك الكيانات الدقيقة للمادة والتي نسميها جسيمات . ومن الأهمية بمكان أن نذكر أن نوعًا واحدًا فقط من السلوكين المتعاكسين هو الذي يتجلى في تجربة ما . وهكذا فإن الإجابة على سؤالنا الأصلي حول طبيعة الضوء معقدة بصورة غير متوقعة (بل ومربكة بالنسبة للكثيرين) : إن كون الضوء مكون من موجة أو تيار من الجسيمات يعتمد على السؤال الذي صممت تجربة من التجارب لكي تجيب عليه .

دعنا الآن نختار فترة زمنية قصيرة t بحيث يكون المقدار ct أصغر بكثير من الطول الموجى لإشعاع الحزمة الضوئية ، وهكذا يكون كل من $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ ثابتين بالضرورة خلال الحجم المظلل ، ونستطيع من ثم كتابة الطاقة المحمولة عبر المستوى بواسطة الحزمة التى حجمها Act لتكون :

$$\text{الطاقة فى الحجم } Act = \left(\begin{array}{c}\text{كثافة طاقة}\\ \text{المجال المغناطيسى}\end{array}\right)(\text{الحجم}) + \left(\begin{array}{c}\text{كثافة طاقة}\\ \text{المجال الكهربى}\end{array}\right)(\text{الحجم})$$

$$\text{الطاقة فى } Act = \frac{B^2}{2\mu_0}Act + \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 Act$$



تقوم الخلايا الشمسية بتحويل الإشعاع الشمسى إلى تيار كهربى يكفى لإدارة هذا السيارة التجريبية .

ولكى نحسب مقدار الطاقة المارة عبر وحدة المساحات من المستوى وفى وحدة الزمن فما علينا إلا أن نقسم المقدار السابق على t وعلى المساحة A للحزمة . وإذن

$$\text{الطاقة لوحدة المساحات فى الثانية} = \frac{c}{2}\left(\frac{B^2}{\mu_0} + \epsilon_0 E^2\right)$$

ويطلق على هذا المقدار شدة الموجة I . وبما أن $B^2 = E^2/c^2 = E^2\epsilon_0\mu_0$ فإن المعادلة يمكن كتابتها على الصورة :

$$I = \text{الطاقة لوحدة المساحة فى الثانية} = \frac{1}{2}c\epsilon_0\,(E^2 + E^2) = c\epsilon_0 E^2$$

وتشير المعادلة الأخيرة إلى أن للحد الخاص بكل من المجالين الكهربى والمغناطيسى نفس المقدار . ونستنتج من ثم أن :

ينقل المجال الكهربى والمجال المغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية مقادير متساوية من الطاقة .

إن الشدة التى حسبناها الآن ذات قيمة **لحظية** لأننا اعتبرنا t كسرًا صغيرًا جدًا من الزمن الدورى للموجة . أما متوسط الشدة عبر كل دورة فهو على درجة أكبر من الأهمية ، ولحسابه نحتاج إلى معرفة القيمة المتوسطة للمقدار E^2 فى دورة واحدة . وقد وجدنا عند دراسة التيارات المترددة أن متوسط مربع أى مقدار يتغير جيبيًا هو نصف مربع السعة ، أو $\overline{E}^2 = \frac{1}{2}E_0^2$.

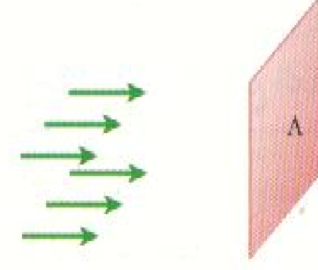
$$\overline{I} = \frac{\text{القدرة فى}}{\text{وحدة المساحات}} = \frac{\text{متوسط الطاقة المحمولة لوحدة الزمن}}{\text{ووحدة المساحات}} = \frac{1}{2}c\,\epsilon_0 E_0^2 \qquad \text{(22-9) (أ)}$$

أو - إذا شئنا - يمكننا كتابة $\overline{I}$ بدلالة B_0 وهى سعة موجة المجال المغناطيسى ، ونذكر أن $E = cB$ ولذا ،

$$\overline{I} = \text{القدرة فى وحدة المساحات} = \frac{1}{2}c\,\epsilon_0 c^2 B_0^2 = \frac{2B_0^2}{2\mu_0} \qquad \text{(22-9) (ب)}$$

حيث استخدمنا العلاقة $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$. ونستنتج من ثم أن (راجع الشكل 13-22) .

متوسط القدرة المنقولة عبر وحدة المساحات بواسطة موجة كهرومغناطيسية تسقط متعامدة على المساحة هو $\frac{1}{2}c\,\epsilon_0 E_0^2 = cB_0^2/2\mu_0$. ويسمى هذا المقدار شدة الموجة .



شكل 13-22: شدة حزمة من الضوء هى الطاقة المارة خلال وحدة المساحات فى الثانية ، على أن تكون الحزمة متعامدة مع المساحة .

ووحدات SI للشدة هى وات لكل متر مربع (W/m^2) . وعليك إثبات أن الكميات الواردة فى المعادلتين (9-22) (أ) و (9-22) (ب) لهما بالفعل هذه الوحدة .

مثال 3-22

يصدر جهاز ليزر معملى حزمة قطرها 1 mm وقدرتها 1 mW . ما هى شدة هذه الحزمة وما هى مقادير المجالين الكهربى والمغناطيسى ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو تعريف الشدة ؟

الإجابة : الشدة هى القدرة لوحدة المساحات . ولدينا هنا قدرة الحزمة وكذا مساحة الحزمة $A = \pi r^2$.

سؤال : كيف ترتبط مقادير المجالات بالشدة ؟

الإجابة : لديك $I = \epsilon_0 cE_0^2/2$ وهى أيضا تساوى $cB_0^2/2\mu_0$. ولك أن تختار إحدى المعادلتين .

سؤال : ما هى العلاقة بين E_0 و B_0 ؟

الإجابة : إنها ببساطة $E_0 = cB_0$.

الحل والمناقشة : الشدة هى

$$I = \frac{10^{-3}\ \text{W}}{\pi(0.5\times10^{-3}\ \text{m})^2} = 1.27\times10^{3}\ \text{W/m}^2$$

وإذا اخترنا التعبير عن I بالمعادلة : $I = cB_0^2/2\mu_0$ نحصل على :

$$B_0^2 = \frac{2\mu_0 I}{c}$$

$$= \frac{2(4\pi\times10^{-7}\ \text{N/A}^2)(1.27\times10^{3}\ \text{W/m}^2)}{3\times10^{8}\ \text{m/s}}$$

$$= 1.07\times10^{-11}\ \text{T}^2$$

ولذلك $B_0 = 3.27\times10^{-6}\ \text{T}$ وفى النهاية

$$E_0 = cB_0 = (3\times10^{8}\ \text{m/s})(3.27\times10^{-6}\ \text{T}) = 9.8\times10^{2}\ \text{V/m}$$

ومن المثير للاهتمام أن شدة حزمة الليزر هذه تناهز شدة ضوء الشمس عند قمة جو الأرض وهى $1.4\times10^{3}\ \text{W/m}^2$. ويلاحظ أيضًا أن المجال المغناطيسى فى الحزمة لا يتجاوز عُشر (1/10) القيمة النموذجية للمجال المغناطيسى للأرض .

22-7 قانون التربيع العكسى للإشعاع

أشرنا فى القسم السابق أن شدة حزمة من الإشعاع تعرف بالطريقة الآتية فنتخيل مساحة ما A موضوعة بحيث تتعامد مع الحزمة كما فى الشكل 13–22 . ولما كانت الحزمة (ولتكن حزمة ضوئية) تحمل طاقة فى اتجاه انتشارها (وفى هذه الحالة إلى اليمين) ، فإن قدرًا معينًا من الطاقة سيمر عبر المساحة فى وحدة الزمن ويكون تعريف شدة الضوء I ممثلًا بالعلاقة التالية :

$$I = \frac{\text{الطاقة}}{\text{المساحة} \times \text{الزمن}} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$



لقد أمكن الحصول على صور كهذه لأحد أقمار كوكب نبتون وهو القمر ترايتون وقد أرسلتها سفينة الفضاء فويجير c . وتعتمد الصورة على مقدرتنا على استقبال ومعالجة الإشارات الكهرومغناطيسية ذات الشدة الخافتة للغاية . وعندما التقطت هذه الصورة كانت فويجير على مسافة تبعد 330,000 ميل عن القمر ترايتون . أما المسافة التى قطعتها الإشارة لكى تصل إلى الأرض فقد زادت على 3 بليون ميل !

دعنا الآن نفحص الطاقة المنبعثة من مصدر ضوئى صغير كالمبين فى الشكل 14–22 . وسنعتبر المصدر من الصغر بحيث يمكن اعتباره **مصدرًا نقطيًا** ، وسنعتبره بعد ذلك مصدرًا **موحد الخواص** ، أى مصدر يبعث الضوء فى كل اتجاه بالتساوى . ولكى نصف الطاقة التى تنطلق من هذا المصدر ، سنتخيل سطحًا كرويًا نصف قطره r_1 ويتحد مركزه مع المصدر الضوئى وسيكون I_1 هو رمز شدة الضوء عن هذا السطح . كما أن الشدة لابد أن تكون متساوية عند جميع نقط الكرة لأننا اعتبرنا المصدر يبعث الضوء بالتساوى فى جميع الاتجاهات ، أى موحد الخواص . وبعبارة أخرى فإن I_1 ستكون هى شدة الضوء عند نقطة تبعد r_1 عن المصدر .

وحيث أن كرتنا التخيلية تحيط تمامًا بالمصدر ، فإن كل الطاقة المنبعثة من المصدر لابد وأن تعبر خلال سطح الكرة ، الذى مساحته $4\pi r_1^2$. والمعدل الكلى الذى يبعث به

المصدر من الطاقة هو قدرة ذلك المصدر P ، ومن هنا نستنتج أن الشدة على بعد r_1 من المصدر هو

$$I_1 = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} = \frac{P}{4\pi r_1^2}$$

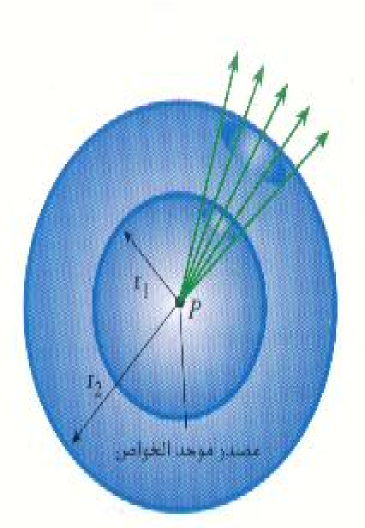
افترض الآن وجود كرة ثانية أكبر من الأولى ونصف قطرها r_2 ولها نفس مركز الكرة الأولى . وإذا تتبعنا نفس الاستدلال لوجدنا أن الشدة I_2 عند مسافة مقدارها r_2 هى :

$$I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$$

(كل ذلك بالطبع إذا اعتبرنا أنه لا يوجد امتصاص للطاقة عند انتقالها بعيدًا عن المصدر) وبأخذ النسبة بين الشدتين نجد أن :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad (22\text{–}10)$$

وهذا هو ما يطلق عليه **قانون التربيع العكسى لإشعاع الطاقة من مصدر نقطى** .
وينص على أن شدة الضوء الصادر من مصدر ما تتناقص تبعًا لمقلوب مربع المسافة المقاسة بعيدًا عن المصدر . ولو أننا ضاعفنا المسافة ثلاث مرات ، مثلاً ، بعيدًا عن المصدر فإن شدة الضوء تتناقص بمعامل قدره 9 .



شكل 14–22:
إذا كان مقدار القدرة التى يبعثها المصدر هو P فما هى قيم شدة الإشعاع عند المسافات r_1 و r_2 ؟

مثال 4-22

تبلغ شدة ضوء الشمس ، كما ذكرنا فى المثال 3–22 $1.4\ kW/m^2$ عند قمة جو الأرض ويطلق على هذا الرقم **الثابت الشمسى** . باعتبار أن الشمس تشع ضوءها فى جميع الاتجاهات بالتساوى ، فكم يكون مقدار القدرة الخارجة (وهو ما يسمى أيضًا ضيائية الشمس) ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين الشدة التى نقيسها وقدرة المصدر ؟

الإجابة : إنها المعادلة 10–22 : $I = \dfrac{P}{4\pi r^2}$

سؤال : ما هى r ؟

الإجابة : إنها المسافة بين الشمس والأرض وهى مذكورة فى جدول الثوابت الفيزيائية والبيانات فى صفحة الغلاف الأخير للكتاب $r = 1.5 \times 10^{11}\ m$.

الحل والمناقشة :

$$P = I(4\pi r^2) = (1.4 \times 10^3\ W/m^2)(4\pi)(1.5 \times 10^{11}\ m)^2 = 3.96 \times 10^{26}\ W$$

تمرين : تبلغ المسافة بين كوكب نبتون والشمس قدر المسافة بين الشمس والأرض ثلاثين مرة . ما هى شدة ضوء الشمس عند موقع نبتون ؟ **الإجابة** : $1.6\ W/m^2$.

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الموجة الكهرومغناطيسية ، (ب) الطيف الكهرومغناطيسى ، (جـ) الموجة اللاسلكية (الراديو) ، (د) الرادار أو الموجات الدقيقة ، (هـ) الإشعاع تحت الأحمر ، (و) الضوء المرئى ، (ز) الإشعاع فوق البنفسجى ، (ح) أشعة إكس . (ط) أشعة جاما ، (ى) شدة الموجات الكهرومغناطيسية .

2 أن تصف فرض ماكسويل حول التيار الإزاحى .

3 أن تعطى تعبيرًا عن سرعة الضوء بدلالة الثابتين الكونيين μ_0 و ϵ_0 .

4 أن تحسب الطول الموجى لموجة كهرومغناطيسية إذا عرفت ترددها أو العكس .

5 أن تخطط شكل المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية .

6 أن تصف العلاقة بين شدتى المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية .

7 أن تشرح بطريقة وصفية كيفية انبعاث الموجات الكهرومغناطيسية من هوائى ثنائى القطب .

8 أن تصف طريقتين يمكن من خلالهما إكتشاف موجات لاسلكية بواسطة جهاز استقبال الراديو . وأن تشرح وظيفة دائرة RLC فى جهاز راديو وكيف تستخدم فى التقاط الإشارات المبثوثة من محطات مختلفة .

9 أن تضع قائمة لأنواع الموجات الكهرومغناطيسية حسب أطوالها الموجية فى ترتيب تنازلى . وأن تذكر نوع الموجة التى ينتمى إليها طول موجى معين .

10 أن تحسب شدة موجة ما إذا عرفت قيم كل من E_0 أو B_0 .

11 أن تحسب سعتى المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية إذا أعطيت شدة الموجة .

12 أن تطبق قانون التربيع العكسى للإشعاع فى حالات بسيطة .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

سرعة الضوء (c)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

تيار ماكسويل الإزاحى (I_D)

يمكن توليد مجالات مغناطيسية بواسطة مجالات كهربية تتغير مع الزمن وأيضًا بواسطة تيار I . وتأثير المجال E المتغير مع الزمن يمكن النظر إليه على أنه يحدث تيارًا تخيليًا ـ تصوريًا ـ I_D يسمى التيار الإزاحى ، حيث

$$I_D = \epsilon_0 A \frac{\Delta E_\perp}{\Delta t}$$

$E_\perp$ هنا هى مركبة $\mathbf{E}$ العمودية على مستوى المساحة A . ويولد التيار I_D مجالاً مغناطيسيًا بنفس الطريقة التى يولد بها تيار حقيقى مجالاً مغناطيسيًا . فإذا كان هناك كل من I_D و I فإن المجال المغناطيسى ينتج عن تيار كلى فعال هو $I_{tot} = I + I_D$.

العلاقة بين سعتى المجالين الكهربى والمغناطيسى فى الموجات الكهرومغناطيسية

$$B = \frac{E}{c}$$

كثافة الطاقة في موجة كهرومغناطيسية

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

أى أن المجالين الكهربى والمغناطيسى يمثلان كثافتى طاقة متساويتين .

شدة الموجات الكهرومغناطيسية (I)

تعرف شدة موجة على أنها متوسط القدرة المنقولة عبر وحدة المساحات :

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 = \frac{\frac{1}{2} c B_0^2}{\mu_0}$$

أى أن المجالين الكهربى والمغناطيسى ينقلان كميات متساوية من الطاقة .

قانون التربيع العكسى للإشعاع

تتغير شدة الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من مصدر نقطى عكسيًا مع مربع المسافة بين نقطة الرصد والمصدر ، ولهذا إذا كانت r_1 و r_2 تمثلان مسافتين من المصدر فإن النسبة بين الشدتين عند هاتين المسافتين هى

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

أسئلة وتخمينات

1 يكون هوائى الإرسال (البث) فى بعض محطات الإذاعة رأسيًا ، بينما يكون أفقيًا فى البعض الآخر . صف وقارن بين الموجات الكهرومغناطيسية المبثوثة من هذين النوعين للهوائيات . وعلى وجه الخصوص ، كيف تتجه **E** و **B** بالنسبة لسطح الأرض .

2 إذا فتحت جهاز راديو ترانزستور فإنك ستلاحظ كيف يركب فيه هوائى على هيئة ملف . كيف نستطيع أن نستخدم الراديو لتحدد ما إذا كان هوائى محطة إرسال بعيدة أفقيًا أم رأسيًا ؟

3 تمر عبر المنطقة المحيطة بك موجات كهرومغناطيسية تبثها معظم محطات الإذاعة فى العالم . كيف يضبط جهاز راديو أو تليفزيون لكى يلتقط محطة تود الاستماع إليها ؟ وعندما تدير مؤشر الراديو فماذا يحدث بالضبط داخل الجهاز لالتقاط المحطات المختلفة .

4 هناك نوعان من هوائيات الاستقبال فى أجهزة الراديو والتليفزيون . يلتقط أحدهما الجزء الكهربى من الموجة الكهرومغناطيسية ويلتقط الآخر الجزء المغناطيسى . افحص جهاز راديو ترانزستور للجيب أو جهاز راديو كبير وحاول أن تعرف أن الطريقتين يستخدم . هل من الممكن استخدام الطريقتين ؟

5 نشاهد من حين لآخر فى دور السينما أو على شاشة التليفزيون رجال الشرطة وهم يحاولون تحديد موقع محطة إرسال لاسلكى سرية وذلك بقيادة سيارة فى المناطق المجاورة ومثبت بالسيارة جهاز يتصل به ملف يدور ببطء من فوق ظهر السيارة . اشرح طريقة عمل الجهاز .

6 يدعى بعضهم ، إنه بالقرب من هوائى إرسال لاسلكى (إذاعى) شديد القدرة ، تصدر أحيانًا شرارة تتقافز عبر سور من السلك . ما رأيك فى هذا الإدعاء ؟

7 يتعرض الطعام والأوانى فى فرن الميكروويف لموجات رادار (كهرومغناطيسية) ذات تردد عالٍ جدًا . ولو تركت ملعقة عفوًا داخل أحد تلك الأفران فإنها تصبح ساخنة جدًا . ما الذى يسخنها هكذا ؟ هل تستطيع تفسير الأثر التسخينى فى إطار الجزء الكهربى من الموجة ؟ أم الجزء المغناطيسى ؟ كيف يتم تسخين المواد غير المعدنية فى الفرن ؟ وهل يمكن تسخين طبق زجاجى فى مثل هذا الفرن ؟

8 هناك بعض الشك حول السلامة البشرية عند التعرض لموجات اللاسلكى القوية أو الموجات الدقيقة (الميكروويف) . كيف لنا أن نتوقع اعتماد تلك الأخطار على تردد الموجات ؟ أى الموجات أكثر خطرًا فى رأيك (إذا كان هناك خطر) ، موجات الراديو (اللاسلكى) أم الموجات الدقيقة (الميكروويف) ؟

9 ارجع إلى الشكل 10–22 . أوجد اتجاه المجال الكهربى عند النقطة A والذى يستحثه المجال المغناطيسى المتحرك .

10 ارجع إلى الشكل 10–22 أوجد اتجاه المجال المغناطيسى عند النقطة P والذى يستحثه المجال الكهربى المتحرك .

11 هل رسم اتجاه وطور الجزء المغناطيسى للموجة فى الشكل 6–22 بشكل صحيح إذا كان المجال المغناطيسى ناتجًا عن المجال الكهربى المتحرك ؟ أعد المسألة بالنسبة للمجال الكهربى الناتج عن المجال المغناطيسى المتحرك .

12 ضع تقديرًا للطول الموجى لموجة كهرومغناطيسية تنتج عن ذبذبة كرة موجبة الشحنة معلقة من حبل طوله متر واحد وتعمل كبندول . قارن بين هذا الطول الموجى مع قطر الكرة الأرضية الذى هو 12,700 km .

مسائل

الأقسام من 1–22 إلى 4–22

1 ما هو الطول الموجى لموجات كهرومغناطيسية يشعها مصدر قدرة تردده 50 Hz ؟

2 ما هو تردد الموجات الكهرومغناطيسية التى أطوال موجاتها : (أ) 1.2 m ، (ب) 12 m و (جـ) 120 m ؟

3 ما هو مدى الأطوال الموجية الذى يغطيه إرسال محطة AM إذاعية تردداتها فى المدى من 540 إلى 1600 kHz ؟

4 ما هو مدى الأطوال الموجية لموجات كهرومغناطيسية تبثها موجة FM الإذاعية بترددات تقع فى المدى من 88 إلى 108 kHz .

5 تكون حساسية العين عند حدها الأقصى بالنسبة للجزء الأخضر المصفر من الطيف الكهرومغناطيسى الذى يبلغ طوله الموجى نحو 5.5×10^{-7} m . ما هو تردد هذا الضوء ؟

■ 6 ضبط جهاز الراديو لديك لكى يلتقط محطة إذاعة على بعد 144 km منك . (أ) ما الزمن الذى تستغرقه إشارة كهرومغناطيسية صادرة من المحطة حتى تصل إلى جهازك ؟ وإذا كانت المحطة تعمل عند تردد مقداره 980 kHz فما عدد الأطوال الموجية بينك وبين المحطة ؟

■ 7 ترتد نبضة رادار تبثها سيارة شرطة إلى جهاز الاستقبال بعد انعكاسها من على شاحنة بعيدة بعد زمن كلى مقداره 5×10^{-4} s . ما المسافة التى تبعد بها الشاحنة عن عربة الشرطة ؟

8 وقع انفجار على بعد 4.0 km من راصد . ما هى الفترة الزمنية بين رؤية الراصد للانفجار وسماعه صوته ؟ (اعتبر سرعة الصوت 340 m/s) .

9 ضبطت دائرة المولفة فى جهاز راديو ليلتقط محطة إذاعية بحيث كانت قيمة المحاثة فى الدائرة 6.4 μH وقيمة السعة 1.9 pF . (أ) ما هو تردد الموجات التى يلتقطها الجهاز ؟ (ب) وما هو طولها الموجى ؟

10 يستخدم جهاز راديو لالتقاط محطة إذاعية تعمل عند تردد مقداره 840 kHz . فإذا كانت دائرة المولفة تحتوى على محاثة مقدارها 0.04 mH ، فما هى سعة المكثف الواجب توافرها لالتقاط هذه المحطة ؟

11 يبلغ تردد قناة تليفزيونية ما نحو 96 MHz . وكانت دائرة موالفة جهاز التليفزيون تستخدم محاثة مقدارها $6.0\ \mu H$. ما هي قيمة سعة المكثف المطلوب لاستقبال قناة التليفزيون المطلوبة ؟

▪ 12 تبلغ محاثة ملف فى دائرة موالفة جهاز راديو $3\ \mu H$. أوجد مدى قيم مكثف الموالفة التى لابد من توافرها حتى يتم التقاط كل مدى ترددات FM وهى ما بين 88 MHz و 108 MHz .

القسم 5-22

13 تبلغ شدة المجال المغناطيسى عند طرف قضيب مغناطيسى $B = 0.85\ T$. ثم زود المغناطيس بسرعة مقدارها 10.0 m/s فى اتجاه متعامد مع طوله . (أ) ما هو مقدار المجال الكهربى المستحث عند نقطة ما عند ما يمر بها طرف ذلك القضيب ؟ (ب) هل من السهولة ملاحظة ذلك المجال الكهربى ؟

14 افترض أنه فى الشكل 10-22 يتحرك قطبا المغناطيس بسرعة مقدارها $v = 8.0\ m/s$ وأن شدة المجال المغناطيسى B بين القطبين هى 0.6 T . (أ) ما مقدار المجال الكهربى عند النقطة A فى اللحظة المشار إليها ؟ (ب) وهل يمكن ملاحظة ذلك المجال بسهولة ؟ (جـ) ما هو اتجاه المجال الكهربى عند النقطة A ؟

▪ 15 افترض أن شدة المجال الكهربى عند النقطة P فى الشكل 11-22 كانت $8 \times 10^3\ V/m$ نتيجة للشحنة فى السلك ، وأن سرعة السلك كانت $v = 6.0\ m/s$. (أ) ما مقدار المجال المغناطيسى المستحث عند النقطة P ؟ (ب) وهل هذا المقدار من الكبر بحيث يسهل قياسه ؟ (جـ) ما هو اتجاه المجال المغناطيسى عند P ؟

▪ 16 تبلغ شدة المجال الكهربى بين لوحى مكثف هوائى متوازى اللوحين $5 \times 10^4\ V/m$. افترض أن المكثف قد حُرِّك موازيا للوحيه بسرعة مقدارها 7.2 m/s . (أ) ما هو مقدار المجال المغناطيسى B عند نقطة يعبرها المجال الكهربى عند تحركه ؟ (ب) وما هو اتجاه ذلك المجال المغناطيسى ؟

17 إذا كانت سعة موجة المجال المغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية هى 1.0 T . فما هى سعة موجة المجال الكهربى الواجب توافرها ؟

18 تبلغ سعة المجال الكهربى فى موجة لاسلكى 0.90 mV/m عند نقطة معينة . ما هى القيمة القصوى لفرق الجهد الذى تستحثه الموجة بين طرفى قطعة من السلك طولها 20 cm وموضوعة عند تلك النقطة ؟

19 تعطى قيمة المجال الكهربى فى موجة كهرومغناطيسية بالمعادلة : $E = 8.0 \times 10^{-4} \cos (6 \times 10^{10} t) V/m$. اكتب معادلة موجة المجال المغناطيسى . ما هو تردد الموجة ؟ وما هو الطول الموجى لها ؟

▪ 20 يمثل المجال المغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية معينة بالمعادلة : $B = 4 \times 10^{-11} \sin (8 \times 10^9 t) T$. (أ) ما هو تردد الموجة ؟ (ب) وما هو الزمن الدورى لها ؟ (جـ) ما مقدار تغير B عندما يتغير t من الصفر حتى T/4 ، حيث T هو الزمن الدورى المحسوب فى (ب) ؟

▪ 21 أوجد متوسط ق.د.ك المستحثة فى المسألة رقم (20) خلال الفترة من $t = 0$ إلى $t = T/4$ داخل عروة من السلك (مساحتها $A = 10.0\ m^2$) موضوعة بحيث تتعامد مع خطوط المجال المغناطيسى .

▪ 22 توصف موجة المجال الكهربى فى موجة كهرومغناطيسية معينة بالمعادلة التالية : $E = 1.0 \times 10^{-2} \sin (3 \times 10^9) V/m$. (أ) أوجد الزمن الدورى للموجة . (ب) اكتب المعادلة التى تمثل المجال المغناطيسى فى الموجة . (جـ) ما هى أقصى ق.د.ك مستحثة فى قضيب معدنى طوله 40 cm وهو فى وضع موازٍ لخطوط المجال الكهربى ؟

القسمان 6-22 و 7-22

23 يستخدم ليزر قدرته 0.60 mW فى تجربة معملية ، وكانت حزمة الليزر أسطوانية الشكل ومساحة مقطعها المستعرض

$0.85\ mm^2$. وباعتبار أن الحزمة مكونة من موجة جيبية منفردة ، أوجد القيم القمية لكل من المجالين الكهربى والمغناطيسى E_0 و B_0 في الحزمة .

24 يرسل نور كشاف إشعاعًا كهرومغناطيسيًا قدرته 4000 W على هيئة حزمة أسطوانية قطرها 0.8 m . باعتبار أن الحزمة مكونة من موجة جيبية منفردة . احسب قيمتي E_0 و B_0 في الحزمة .

25 متوسط شدة الإشعاع الشمسى الذى يصل إلى قمة جو الأرض هو $1340\ W/m^2$. احسب مقادير المجالين الكهربى والمغناطيسى لموجة كهرومغناطيسية مكافئة .

26 تشع بصيلة إضاءة قدرتها 25 W بانتظام فى جميع الاتجاهات . احسب القيم القصوى للمجالين الكهربى والمغناطيسى لموجة كهرومغناطيسية مكافئة . (أ) على مسافة مقدارها 2 m و (ب) 5 m من البصيلة .

27 تبلغ شدة موجة صادرة من محطة إذاعة بعيدة ترددها 1.4 MHz ، ما مقداره $4.0\ 10^{-10}\ W/m^2$. اكتب معادلتى موجتى المجال الكهربى والمجال المغناطيسى فى هذه المنطقة .

▪ 28 تبلغ مساحة المقطع المستعرض لحزمة ليزر $3.6\ mm^2$ وقدرته 1.2 mW . باعتبار أن حزمة الليزر تتكون من موجة جيبية منفردة ، أوجد شدة الحزمة والقيمتين القصوتين للمجالين الكهربى والمغناطيسى E_0 و B_0 فى الحزمة .

29 يرسل جهاز إرسال إذاعى موجات ترددها 96 MHz بقدرة 65 W . اعتبر أن الإشعاع منتظم على سطح كرة يقع على جهاز الإرسال عند مركزها . (أ) ما هى شدة الموجات عند نقطة تبعد 12 km عن جهاز الإرسال ؟ (ب) ما هما سعتا موجتى المجالين الكهربى والمغناطيسى عند هذه النقطة ؟

30 تتدلى بصيلة مصباح صغير من سقف فى منتصف غرفة ما . ما هى النسبة المئوية التى تتناقص بها شدة الضوء الصادر من البصيلة إذا تحركنا من نقطة تبعد 4.0 m من البصيلة إلى نقطة أخرى تبعد 9.0 m عنها ؟

▪ 31 احسب شدة الضوء التقريبية عند سطح منضدة طعام يبعد مسافة 1.8 m عن بصيلة إضاءة قدرتها 150 W وتبلغ كفاءة توليدها للضوء 10% (أى أن 10% فقط من القدرة المستهلكة هى التى تتحول إلى ضوء) . اذكر أية خطوات تقريبية تقوم بها وناقش مدى صلاحيتها .

▪ 32 وجد أن شدة الضوء المقاسة عند نقطة تبعد 2.0 m عن مصدر ضوئى شديد ودقيق الحجم هى $2.2\ W/m^2$. فما هى الشدة الصادرة عن نفس المصدر إذا قيست على بعد مقداره 5.0 m ؟

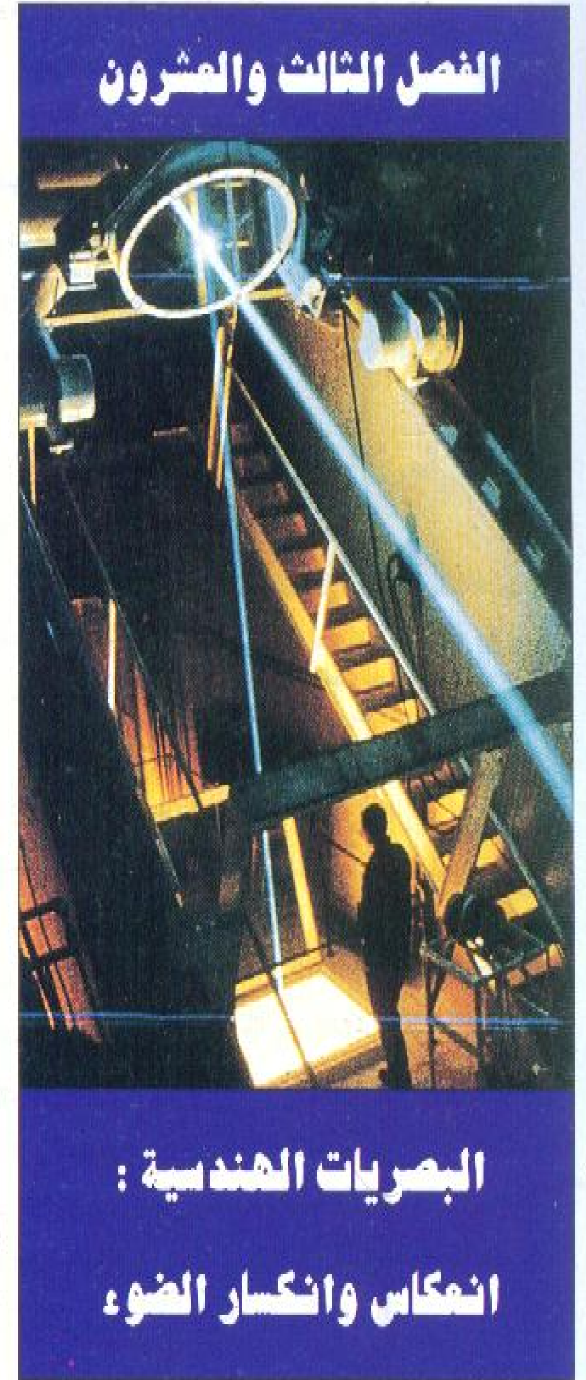
مسائل إضافية

▪ 33 احسب متوسط القدرة التى يشعها بانتظام فى جميع الاتجاهات مصدر ما ، إذا كانت سعة المجال المغناطيسى هى $6 \times 10^{-6}\ T$ عند نقطة على بعد 3 m من المصدر .

▪ 34 تبث محطة إذاعة بانتظام فى جميع الاتجاهات بقدرة متوسطها 18 kW . احسب القيمة القصوى للمجال الكهربى عند (أ) 1 km ، (ب) 5 km ؛ (جـ) 25 km من جهاز الإرسال .

▪ 35 يبث جهاز إرسال موجات كهرومغناطيسية بانتظام فى جميع الاتجاهات بقدرة قيمتها 80 W . وقد وجد أن القيمة القصوى للمجال الكهربى عند نقطة بعيدة ، والناجمة عن هذا المصدر هى 16 mV/m . فكم يبعد جهاز الإرسال عن هذه النقطة ؟

▪ 36 يستخدم فى منزل ما هوائى طبقى قطره 22 m لاستقبال إشارات تليفزيونية مبثوثة من محطة تليفزيونية بعيدة . اعتبر أن الإشارة التليفزيونية هى موجة جيبية متصلة ومنفردة . والمجال الكهربى بها سعته $E_0 = 0.1\ mV/m$ ، وأن الهوائى يمتص كل الإشعاع الواقع على الطبق الدائرى . (أ) ما هى سعة المجال المغناطيسى فى الموجة ؟ (ب) احسب شدة الإشعاع و (جـ) القدرة ، اللتين يستقبلهما الهوائى .



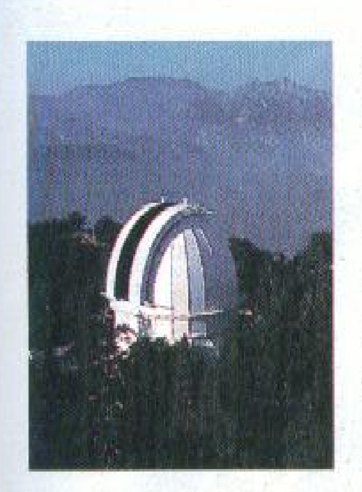
سينصب اهتمامنا في هذا الفصل والفصلين التاليين له ، بشكل أساسي على جزء صغير جدًا ـ وإن كان مهمًا للغاية ـ من الطيف الكهرومغناطيسي : ونعني به تلك المنطقة من الطيف ذات الأطوال الموجية حيث العين البشرية حساسة لها . ويشار إلى هذه المنطقة باسم **الضوء المرئي** أو مجرد الضوء . وعلى الرغم من أن اهتمامنا الأساسي منصب على الضوء المرئي إلا أن كثيرًا مما سندرسه قابل للتطبيق على الإشعاع الكهرومغناطيسي كله .

23-1 مفهوم الضوء

يمدنا الإبصار ـ من بين كل الحواس ـ بمعلومات أكثر مما تفعل كل الحواس الأخرى مجتمعة سواء من حيث كميتها أو تفاصيلها . ويعتمد ما نراه ـ أساسًا ـ على خواص الضوء ، كما يعتمد على العمليات الفيزيائية والنفسية لتفسيره . فلا غرابة إذن في أن طبيعة الضوء ظلت دائمًا موضوعًا لكثير من التأمل والاهتمام . وعلى الرغم من هذا الاهتمام الكبير والمحاولات العديدة للتفسير إلا أن السؤال حول ماهية الضوء ظل محل جدل حتى العقد الأول من القرن العشرين . وقد أوردنا جانبًا من التفاصيل المميزة

للبحث التاريخى عن فهم حقيقى للضوء فى المقال الخاص « بالخلافات فى الفيزياء » فى الفصل الثانى والعشرين . وسوف نذكر هنا قليلاً من العلاقات البارزة عندما نفحص ما نعرفه الآن حول خواص الضوء .

لقد تركز الجدل فى عصر نيوتن حول السؤال عما إذا كان الضوء مكونًا من تيار من الجسيمات أو « الكريات » ، أو أنه ظاهرة موجية من نوع ما . وقد مال نيوتن إلى فكرة الجسيمات . وكانت مكانته العلمية سببًا فى اقتناع الكثيرين برأيه . ثم قدم توماس يونج عام 1803 نتائج تجربة ظهر فيها أن الضوء المنبعث من مصدرين يكوّن أشكال تداخل تماثل تلك التى يمكن أن تحدث من تراكب موجتين . وسوف نشرح تجربة يونج بالتفصيل فى الفصل الرابع والعشرين . ثم قيست فى نفس الوقت تقريبًا سرعة الضوء المار فى الماء ووجد أنها أقل من سرعة الضوء فى الهواء . وحيث أن نظرية الجسيمات لنيوتن قد نصت على أن الضوء لابد أن يسير بسرعة أكبر فى الماء ، فقد كان هذا دليلاً ثانيًا يناقض تلك النظرية . وهكذا صارت النظرية الموجية هى التفسير السائد للضوء ، ثم زودت بالأساس الرياضى الدقيق فى ستينيات القرن التاسع عشر عن طريق العمل المتميز لماكسويل (الفصل الثانى والعشرون) .



جبال سان جابرييل (ويرى جبل ويلسون فى المقدمة) ، حيث أجرى مايكلسون أكثر قياساته دقة لسرعة الضوء فى العشرينيات من القرن العشرين .

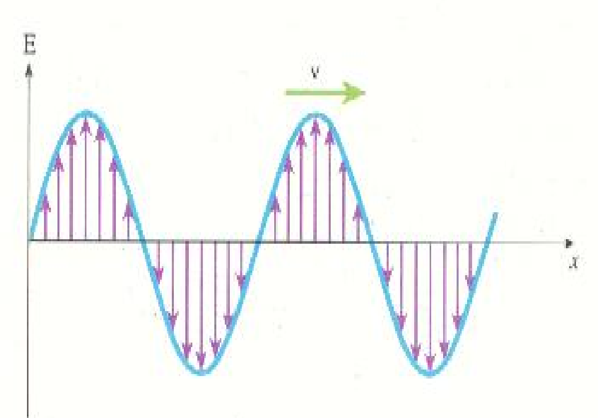
ولنا أن نعتقد أنه بحلول العام 1900 فإن الطبيعة الموجية للضوء لابد وأن تكون قد أصبحت مفهومة جيدًا ، بل ومقبولة على نطاق واسع . إلا أن تفاعل الضوء مع المادة ؛ من حيث كيفية انبعاثه وكيفية امتصاصه ؛ قد ظل أمرًا محيرًا . ولم يكن ممكنًا تفسير طيف الضوء المنبعث من الأجسام الساخنة (إشعاع الجسم الأسود) ، وكذلك المنبعث من ذرات بسيطة مثل الهيدروجين ، فى ضوء النظرية الموجية بشكل كافٍ وقد فُسرت الظاهرة المعروفة **بالأثر الكهروضوئى** ، حيث تتطاير الإلكترونات من الأسطح الفلزية التى يسقط عليها الضوء ، بشكل ناجح عام 1905 على يدى أينشتين ، عندما استخدم فكرة أن الضوء يتفاعل مع الإلكترونات كما لو كان مكونًا من تيار من الجسيمات وقد وصلنا إلى هدنة مشوبة بالحذر ـ عندما ظهرت نظرية الكم خلال القرن العشرين ـ مع فكرة إنه تحت ظروف معينة يسلك الضوء سلوك الموجة ، بينما يسلك تحت ظروف أخرى سلوك تيار من الجسيمات التى لا كتلة لها تدعى **الفوتونات** . وسوف نتناول هذه الطبيعة المزدوجة للضوء بصورة أكمل فى الفصل السادس والعشرين . أما بالنسبة للفصول القليلة القادمة ، فسوف نركز على جوانب الضوء التى يمكن فهمها من خواص الموجات الكهرومغناطيسية المميزة .



شكل 1–23:
التناظر بين الأطوال الموجية والألوان الموضحة هنا تقريبية فقط . والألوان مثل الأزرق المخضر والبرتقالى تحتل مناطق متوسطة (انظر أيضًا الشكل 8-22) .

الموجات الضوئية هى موجات كهرومغناطيسية ذات مجال كهربى مهتز يتعامد مع مجال مغناطيسى مهتز ويتفق معه فى الطور ، كما سبق وأشرنا فى الفصل السابق . وتقع الأطوال الموجية للضوء المرئى فى المدى من 400 إلى 700 nm (الشكل 1–23) . ويمكننا باستخدام المعادلة (1–22) ملاحظة أن هذا المدى من الأطوال الموجية ينتمى إلى مدى الترددات من 4.3×10^{14} إلى 7.5×10^{14} Hz . ويوضح الشكل 2–23 المجال الكهربى فى موجة تنتشر فى اتجاه المحور x . ويلاحظ أن المجال المهتز E متعامد مع

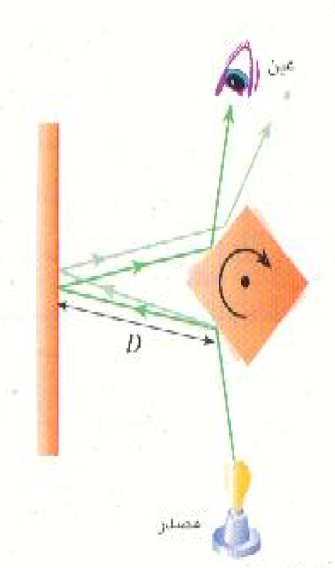
المحور x ، ومن ثم تكون **الموجات الضوئية** ، **موجات مستعرضة** ، حيث أن اهتزازات الموجة متعامدة مع اتجاه الانتشار . وهكذا فلهذه الموجات كثير من الخواص المشتركة مع موجات مستعرضة أخرى مثل الموجات التى تتكون بالأوتار أو الموجات المتكونة على سطح الماء . ومن أكثر الأدلة المباشرة على أن الضوء عبارة عن موجات مستعرضة هى إمكانية **استقطابه** . فالموجات المستعرضة فقط هى التى لها هذه الخاصية . وسوف نتناول استقطاب الضوء فى الفصل الرابع والعشرين .



شكل 2-23:
يتذبذب المجال الكهربى فى موجة كهرومغناطيسية عموديًا على اتجاه الانتشار ، ولذلك تعتبر الموجة مستعرضة .

2-23 سرعة الضوء

لابد إنك تذكر من القسم 1-2 ، أن سرعة الضوء فى الفراغ تعرف بوحدات SI على أن قيمتها الدقيقة هى $c = 299{,}792{,}458$ m/s وهو ما نقربه عادة إلى الرقم 3.0×10^8 m/s . وقد اختير هذا التعريف ليتفق مع القيمة المقاسة لسرعة الضوء بدلالة المتر . المعرَّف فى القسم 1-2 . وقد جرت محاولات كثيرة لقياس c قبل الاتفاق على هذا المعيار . فقد كان جاليليو واحدًا من الأوائل الذين حاولوا ذلك ، وقد فشل فى ذلك ولكنه استنتج فقط أن انتقال الضوء « إن لم يكن لحظيًا فهو سريع للغاية » . ثم ظهرت أول نتيجة كمية عام 1675 عندما استخدم الفلكى الدانماركى رومر الحركة النسبية بين الأرض وأحد أقمار كوكب المشترى ، حيث استنتج أن الضوء ينتقل بسرعة 2.1×10^8 m/s تقريبًا . ويعزى معظم الخطأ فى قياسات رومر إلى القيمة غير الصحيحة لنصف قطر مدار الأرض . أما فى عام 1849 فقد قاس الفيزيائى الفرنسى فيزو الزمن الذى يستغرقه الضوء للانتقال بين جبلين جيئة وذهابًا وكانت المسافة بين الجبلين 8.6 km . وكانت قيمة c كما أعطتها تجارب فيزو هى $c = 3.1 \times 10^8$ m/s .



شكل 3-23:
رسم مبسط لتجربة مايكلسون لقياس سرعة الضوء وإذا أدير المكعب المفضض بالسرعة المناسبة تمامًا فإن الشعاع سينعكس إلى عين المشاهد . وتكون المسافة D فى الواقع أكبر بكثير عما هو مبين بالشكل .

إن أول قياسات عالية الدقة هى ما قام بها الأمريكى أ. أ. مايكلسون فى عشرينيات القرن العشرين ، إذ قاس مايكلسون زمن الرحلة التى يقطعها شعاع ضوئى جيئة وذهابًا بين جبل سان أنطونيو (ويسمى الآن جبل بالدى) وجبل ويلسون الذى يبعد عنه 70 km . وكلاهما يقع فى كاليفورنيا . واستخدم مايكلسون جهازًا يوضح الشكل 3-23 رسمًا مبسطًا له . ينعكس شعاع ضوئى منبعث من المصدر من على أحد جوانب مكعب فضضت أربع أسطح منه . ثم ينعكس كما هو موضح بالشكل . فإذا كان المكعب فى الوضع الصحيح

تمامًا فإن الشعاع سيصل إلى عين المشاهد فى الوضع المبين بالشكل .

اقترض الآن أن المكعب أدير حول محور يمر بمركزه ويتعامد مع الصفحة . وعندما يحتل المكعب الموضع المبين بالخطوط الثقيلة كما فى الشكل 3-23 فإن الشعاع ينعكس نحو المرآة كما هو مبين . وبمرور الوقت فإن الشعاع سيعود إلى المكعب قادمًا من المرآة ، إلا أن المكعب سيكون قد غادر الموقع الأول ودار حول نفسه إلى موضع كالمبين بالخطوط الخفيفة ، أى أن الشعاع لن ينعكس نحو عين المشاهد . أما إذا أريد للشعاع أن يصل إلى عين المشاهد فلابد أن يكون المكعب قد أدير ربع دورة تمام خلال الزمن الذى يستغرقه الشعاع لكى يصل إلى المرآة ويرتد منها ، إذ أنه تحت هذا الشرط فقط سيكون المكعب مرة أخرى فى الوضع الموضح بالخطوط الثقيلة كما فى الشكل 3-23 ، وعندئذ يقوم المكعب بعكس الشعاع إلى العين .

جدول 1-23:
سرعة الضوء عند الطول الموجى 589 nm



المادة	السرعة $(10^8\ m/s)$
الفراغ	2.99792
الهواء	2.9970
الماء	2.25
إيثانول	2.20
بنزين	2.00
زجاج كراون	1.97
بولى ستيرين	1.89
زجاج فلنت	1.81
الماس	1.24

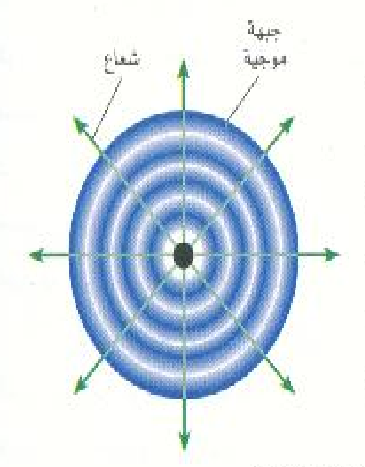
ويتلخص أسلوب القياس فى تغيير سرعة دوران المكعب إلى أن يدخل الشعاع المنعكس إلى العين . وعند هذه القيمة لسرعة الدوران ، فإننا نعلم أن الزمن الذى تستغرقه 1/4 دورة مساوٍ للزمن الذى يستغرقه الضوء لكى يقطع مسافة مقدارها $2\ D$. من الضرورى إذن أن نعرف فقط سرعة دوران الكعب والمسافة D حتى نتمكن من حساب سرعة الضوء . وقد أثبتت تجربة مايكلسون أن سرعة الضوء هى $2.99796 \times 10^8\ m/s$.

لقد أجريت التجارب التى قررت القيمة الحالية لسرعة الضوء c فى بداية السبعينيات من القرن العشرين ، باستخدام قياسات الطول الموجى والتردد للضوء المنبعث بالليزر . وستظل هذه القياسات هى أكثر ما أجرى من القياسات دقة بالنسبة لأى ثابت فيزيائى .

وينتقل الضوء بأقصى سرعة له خلال الفراغ ، بمعنى أن سرعته خلال المواد الأخرى أقل دائمًا من c . وعلاوة على ذلك فسرعته خلال المواد المختلفة ـ فيما عدا الفراغ ـ تعتمد على الطول الموجى للضوء وعلى المادة نفسها كذلك . ويوضح الجدول 1-23 قائمة بقيم سرعة الضوء فى المواد المختلفة .

23-3 انعكاس الضوء

عندما يلقى حجر فى بركة ماء ، فإن مجموعة من الموجات الدائرية أو **الجبهات الموجية** ، تتحرك منطلقة من النقطة التى ارتطم فيها الحجر بالماء ، وتنتقل الموجة المبينة فى الشكل 4-23 ، فى اتجاه أنصاف الأقطار نحو الخارج بدءًا من المركز . وتسمى الأسهم المرسومة فى الاتجاه الذى تتحرك فيه الجبهات الموجية ، **أشعة** . ويلاحظ أن الأشعة دائمًا متعامدة على الجبهات الموجية كما تعلمنا بالفعل فى القسم 1-15 . ونستطيع من ثم أن نصف حركة الموجة وذلك برسم أى من الأشعة أو الجبهات الموجية . ولكل من الطريقتين قيمتها .



شكل 4-23:
تتعامد الأشعة مع الجبهات الموجية وهى تدل على اتجاه انتشار الموجة .

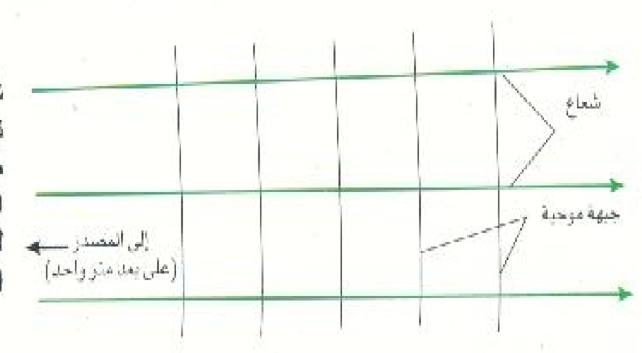
ونلاحظ من الشكل 5-23 كيف يبدو شكل الجبهات الموجية والأشعة عند نقطة بعيدة عن المصدر . والجبهات الموجية قطاعات من الدوائر التى أنصاف أقطارها تساوى 1 m ، مشيرة بذلك إلى أن المصدر يبعد 1 m . كما يلاحظ أن الجبهات الموجية تمثلها

خطوط مستقيمة تقريبًا والأشعة تكاد تكون موازية لبعضها البعض وفي حالة الأبعاد الثلاثة فإن الجبهات الموجية مستوية تقريبًا . ومن ثم فبالنسبة لمصدر بعيد ، يشار إلى مثل هذه الموجات على أنها **موجات مستوية** . ومصطلح **الضوء المتوازى** الذى يصف شكل الأشعة ؛ مرادف لمصطلح **الموجات المستوية** الذى يشير إلى شكل جبهة الموجة .

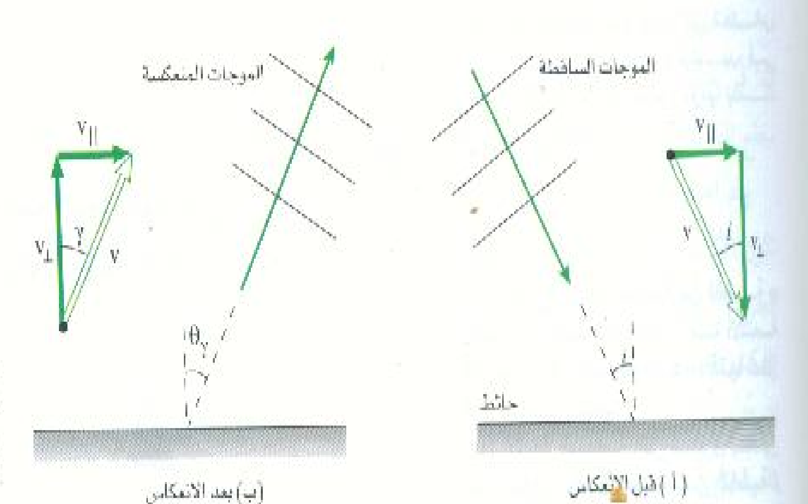
افترض أن موجات مائية مستوية تسقط على حائط مسطح كما يبين الشكل 6-23 (أ) ويمكن تحليل سرعة الموجة القادمة إلى مركبتين ، إحداهما $v_\perp$ متعامدة على الحائط والأخرى $v_\parallel$ موازية له . وعند الارتطام بالحائط فإن $v_\perp$ تعكس اتجاهها بينما يظل اتجاه $v_\parallel$ بدون تغيير . ونتيجة لهذا تنعكس الموجة من السطح . ويوضح الشكل 6-23 (ب) الشعاع المنعكس ومركبتى سرعته . وسنحاول الآن معرفة العلاقة بين زاوية السقوط θ_i المبينة فى الجزء (أ) وزاوية الانعكاس θ_r المبينة فى الجزء (ب) .

وكما هو مبين فإن $\cos\theta_i = v_\perp/v$ (الشكل 6-23 (أ)) و $\cos\theta_r = v_\perp/v$ (الشكل 6-23 (ب)) . ومن ثم ، وحيث أن جيبى التمام (cos) متساويان ، فإن زاوية السقوط تساوى زاوية الانعكاس .

وهذه الحقيقة التى تنطوى على انعكاس موجة الماء بحيث تكون زاوية السقوط مساوية لزاوية الانعكاس ، صالحة بشكل عام ؛ بحيث يمكننا استخدام نفس الاستدلال لإثبات أن الموجات الضوئية تنعكس هى الأخرى بنفس الطريقة . ويلاحظ فقط أن الفرض الأساسى الذى طرح هو أنه عند الانعكاس ، تنعكس مركبة السرعة المتعامدة على السطح ؛ فى حين أن المركبة الموازية للسطح لا تتغير . وهذه النتيجة حقيقية لأى نوع من الموجات



شكل 5-23: تكون الأشعة الصادرة من مصدر بعيد متوازية تقريبًا ، كما يلاحظ أن الجبهات الموجية مستوية تقريبًا . وبالنسبة لجسم لانهائى البعد فإن الموجات تعتبر استوائية (مستوية) وتعتبر الأشعة متوازية .



شكل 6-23: تنعكس الموجة الساقطة بحيث أن زاوية السقوط i تساوى زاوية الانعكاس r .



عند وضع جسم ما أو أجسام بين مرآتين مستويتين تواجه كل منهما الأخرى فإن صورًا متعددة تتكون .

يتحقق بشأنها هذا الفرض . وقد أثبتت القياسات المتعلقة بالضوء وأشكال أخرى للإشعاع الكهرومغناطيسي صحة هذا الاستنتاج وعلى ذلك يمكننا صياغة القاعدة الآتية المعروفة باسم **قانون الانعكاس** .

زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس .

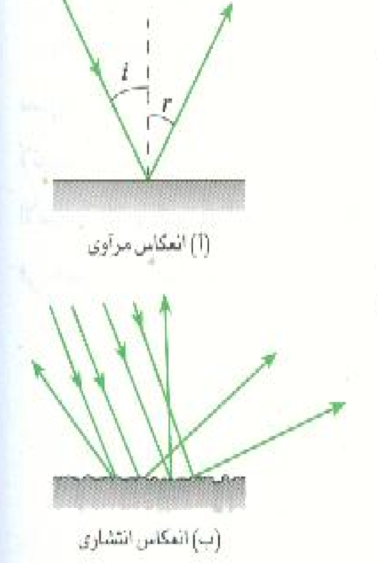
ويسمى ذلل النوع من الانعكاس المبين في الشكل 7-23 (أ) ، حيث يكون السطح العاكس أملس تمامًا كما في حالة المرآة : **انعكاسًا مرآويًا** . أما الأسطح الخشنة مثل الورق أو الجدران المطلية فإنها تؤدي إلى **انعكاس انتشاري** كالمبين في الشكل 7-23 (ب) . وعلى الرغم من أن قانون الانعكاس ينطبق بالنسبة لهذه الأسطح على أشعة منفردة في الحزمة الضوئية إلا أن الأسطح غير الملساء تجعل الأشعة تنعكس بزوايا مختلفة من على المستوى المتوسط للسطح .

23-4 المرايا المستوية

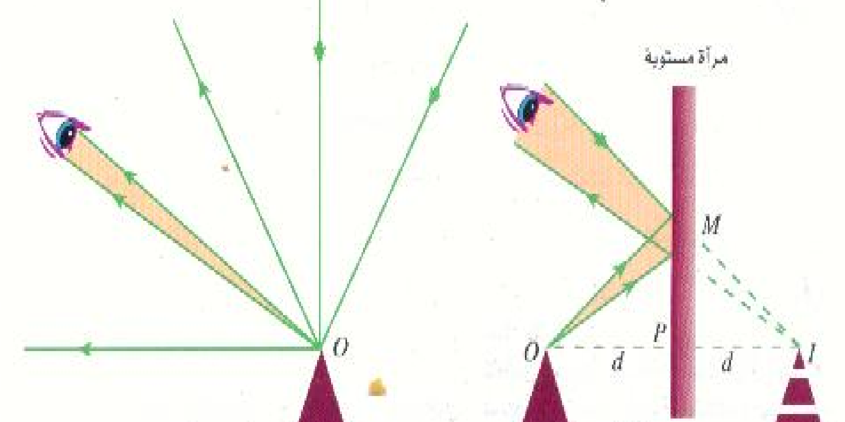
سنقوم الآن بتطبيق ما عرفنا منذ قليل حول الانعكاس على الموضوع المهم الخاص بتكون الصور بواسطة المرايا . وسنتناول أولاً كيف تقوم مرآة مستوية (أي مرآة مسطحة) بتكوين صورة ما .

كلما نظرت إلى نفسك في المرآة كل يوم ، فإنك ترى صورة وجهك أمامك . فإذا ما توقفت لتفحص بدقة ما تراه فإنك ستدرك كما لو كانت صورتك موجودة خلف سطح المرآة . وفي الحقيقة فإن الصورة تبدو كما لو كانت تقع على نفس المسافة خلف المرآة كالتي يبعد عنها وجهك أمام المرآة . دعنا الآن نفحص مثل هذا الانعكاس لكي نفهم بوضوح كيفية رؤية الصورة هكذا .

هب أنك قد وضعت جسمًا ما أمام مرآة ، وأنك ترغب في معرفة الموقع الذي تحس به عينك لصورة الجسم . إن كل نقطة من نقط الجسم تعمل كمصدر نقطي للضوء ، وهذه المصادر إما أنها تبعث الضوء أو تعكسه في شكل أشعة متفرقة . وعندما ننظر مباشرة إلى طرف الجسم ، كما هو مبين في الشكل 8-23 (أ) ، فإن ما تراه ، سيكون كسرًا



شكل 7-23:
زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس بالنسبة لكل شعاع في حزمة ضوئية ويعكس السطح المنبسط كل الأشعة بحيث تكون متوازية معًا مما يؤدي إلى انعكاس مرآوي . أما السطح الخشن فيتسبب في انتشار الأشعة عند الانعكاس مؤديًا بذلك إلى انعكاس انتشاري .



شكل 8-23:
(أ) تتفرق الأشعة المنبعثة من نقطة o للجسم في جميع الاتجاهات . أما الأشعة المحصورة في المسافة الصفراء فإنها تدخل العين ويمكن رؤيتها .
(ب) الأشعة المنعكسة التي ترى بالعين تبدو كما لو كانت قادمة من النقطة I الواقعة على صورة الجسم o .

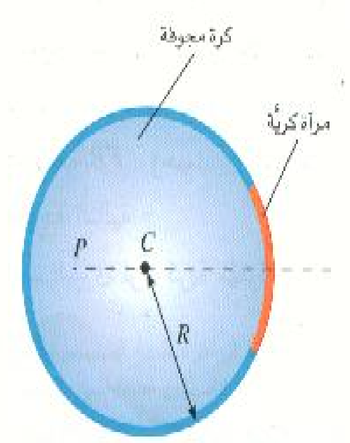
صغيرًا فقط من الضوء الذى يتفرق من تلك النقطة والذى يدخل إلى حدقة عينك . أما حين تنظر إلى نفس أحزمة الأشعة الضوئية عند انعكاسها بواسطة المرآة ، كما فى الشكل 8-23 (ب) فإن عقلك سيفسر هذه الأشعة كما لو كانت قادمة فى خطوط مستقيمة من نقطة تقع خلف المرآة . وهذه النقطة المبينة فى الشكل 8-23 (ب) هى ما نسميه صورة طرف الجسم . ويمكنك اختيار أية نقطة أخرى من نقط الجسم وترسم مسارًا مماثلاً للأشعة . **إن كل نقطة من نقط الجسم لها صورة نقطة مناظرة خلف المرآة** ، وهى النقطة التى تنطلق منها الأشعة التى تغادر نقطة الجسم وتبدو كما لو أنها قادمة بعد انعكاسها بالمرآة . وقد شئنا ألا نرسم الأشعة القادمة من نقط أخرى للجسم وذلك من أجل وضوح الصورة ، ولكن عليك إدراك أن الأشعة المنعكسة معًا على كل النقط الواقعة على الجسم هى التى تُكوِّن الصورة الكاملة .

وعند تطبيق قانون الانعكاس على الأشعة فى الشكل 8-23 (ب) ، فإنه يصبح من السهل إثبات أن المثلثين OMP و IMP متطابقان ، بحيث تكون النقط المتناظرة للجسم والصورة ، واقعة على مسافات متساوية أمام وخلف المرآة .

ويسمى هذا النوع من الصور ، والذى لا تخترق فيه الأشعة المرئية جسم المرآة **صورًا تقديرية أو صورًا تخيلية** . وبعبارة أخرى ، فإن الأشعة التى تصل إلى العين لا تأتى حقيقة من النقطة التى نرى عندها الصورة . وليست هناك إمكانية بالمرة بحيث يمكن إظهار الصورة على صفحة من ورق موضوعة عند النقطة I خلف المرآة . إنما هو العقل الذى يفسر أن الضوء قادم بالفعل من النقطة I . ويظل حقيقيًا دائمًا أن صورة الجسم المرئية بالانعكاس من مرآة مستوية هى صورة تقديرية . وتكون الصورة دائمًا على بعد خلف المرآة مساوٍ لبعد الجسم أمامها .

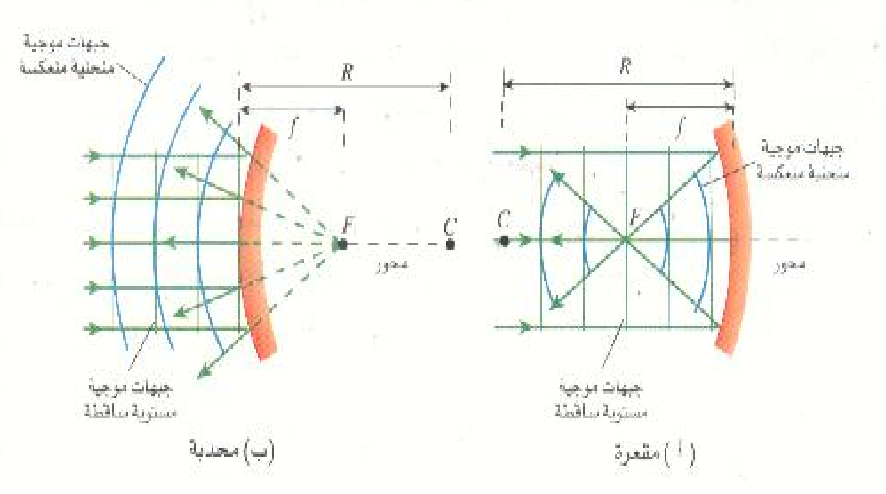
23-5 البعد البؤرى لمرآة كرية

المرايا المستوية هى التى نستخدمها جميعًا ، أما المرايا الكرية فليست شائعة الاستعمال . إلا أن المرايا المستخدمة أثناء التجميل أو الحلاقة ، عبارة عن أجزاء من سطح كرة مجوفة ، كما يبين الشكل 9-23 . ويسمى الخط PA الذى يخترق مركز الكرة ويتعامد مع سطحها **المحور الرئيسى للمرآة** . وعندما ينعكس الضوء من السطح الداخلى للكرة كما فى الشكل 10-23 (أ) فإن المرآة تسمى مرآة **مقعرة** ؛ أما إذا انعكس من على سطح الكرة الخارجى كما فى الشكل 10-23 (ب) فإن المرآة تكون مرآة **محدبة** .



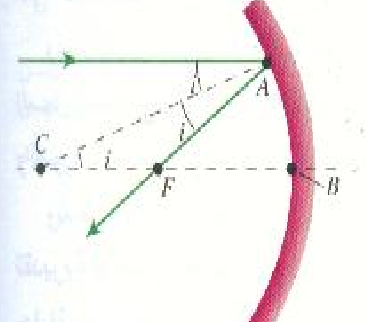
شكل 9-23:
المرآة الكرية هى كرة مجوفة . ونصف قطر المرآة هو R ومركز انحنائها هو النقطة c . أما محورها الرئيسى فهو الخط PA . ويمر المحور الرئيسى خلال مركز الانحناء والنقطة المركزية على سطح المرآة .

وقد اعتبرنا فى الرسم المبين فى الشكل 10-23 أن الضوء قادم من مصدر بعيد بحيث تكون الأشعة القادمة متوازية والجبهات الموجية ممثلة بمستويات . وكما هو مبين فى الجزء (أ) فإن الأشعة المتوازية التى تنتقل باتجاه المحور الرئيسى لمرآة مقعرة ، تنعكس كلها نحو نقطة واحدة هى F . (هذا الأمر صحيح بالتقريب فقط كما سنرى لاحقًا) . وتسمى النقطة التى ينعكس إليها الضوء القادم من نقطة بعيدة بواسطة مرآة مقعرة **بؤرة** (**أو النقطة البؤرية**) المرآة . ويوضح الشكل 10-23 (ب) ما يحدث للأشعة



شكل 10–23: (أ) يتجمع الضوء المنعكس للأشعة المتوازية الساقطة على مرآة مقعرة عند البؤرة F أمام المرآة ، (ب) أما الأشعة المتوازية الساقطة فتنعكس من على مرآة محدبة بحيث تبدو متفرقة من نقطة البؤرة F خلف المرآة .

المتوازية عندما تنعكس من مرآة محدبة . إن الأشعة المنعكسة تبدو كما لو كانت آتية من نقطة F تقع **خلف** المرآة . وهذه النقطة هي بؤرة المرآة المحدبة (أو نقطة البؤرة بالنسبة لها) والمسافة الواقعة بين النقطة المركزية للمرآة ونقطة البؤرة F في كلٍ من النوعين - تسمى **البعد البؤري f** للمرآة .



شكل 11–23: ينعكس الشعاع القريب من المحور الرئيسي والموازي له من مرآة مقعرة بحيث يمر خلال النقطة البؤرية .

سنفحص الآن ما يحدد البعد البؤري لمرآة مقعرة . اعتبر شعاعًا ساقطًا (قادمًا) وموازيًا للمحور الرئيسي CB يرتطم بالمرآة عند النقطة A في الشكل 11–23 . الخط CA هو نصف قطر المرآة ولذا فهو متعامد على سطح المرآة عند A . ونذكر من القسم 3–22 أن قانون الانعكاس قد تم تعريفه بدلالة الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود المقام على السطح العاكس . ولهذا فإن الشعاع المنعكس الذي يغادر النقطة A في الشكل 11–23 بزاوية مقدارها θ_i مع الخط CA يقطع المحور الأساسي عند النقطة البؤرية F . وحيث أن الشعاع الساقط كان موازيًا للمحور الرئيسي CB ، فإن الزاوية ACB لابد وأن تكون مساوي للزاوية θ_i . ومعنى هذا أن المثلث CFA متساوي الساقين ، بحيث تتساوى المسافتان CF و FA . فإذا كان الشعاع الساقط ليس بعيدًا جدًا عن المحور الرئيسي ، بحيث تقع النقطة A بالقرب من B فإن FA (ومن ثم CF) يساويان بالتقريب FB . وحيث أن $CF + FB = R$ هو نصف قطر الكرة ، فإننا نحصل على النتيجة التالية :

البعد البؤري لمرآة كرية مقعرة هو نصف نصف قطر انحناء المرآة :

$$FB = f = \frac{R}{2} \tag{23-1}$$

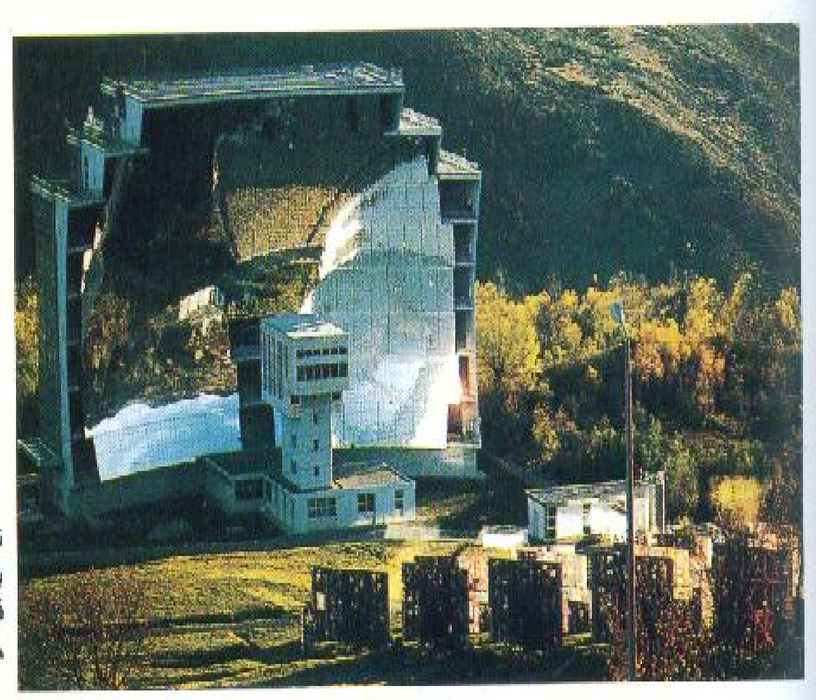
على أنه ليس صحيحًا تمامًا أن كل الأشعة الموازية للمحور الرئيسي تنعكس لكي تمر خلال نفس النقطة F . وكنوع من التدريب يمكنك أن ترسم حالة مثل ذلك الشعاع الذي ينعكس من نقطة تبعد كثيرًا عن المحور الرئيسي وتثبت أنه لا ينعكس خلال F . على أننا إذا قصرنا الأشعة الساقطة على ذلك الجزء من المرآة حيث القوس AB أصغر بكثير من نصف قطر الكرة فإن ما نجريه من تقريب عند اشتقاق المعادلة 1–23 يكون جيدًا .

ويمكننا تحقيق ذلك إما باستخدام فتحة صغيرة فى حائل يوضع أمام المرآة أو بجعل المرآة نفسها صغيرة بالمقارنة مع نصف قطر انحنائها . ويطلق مصطلح **الزيغ الكرى** على العيب الذى يحدث عندما لا تمر الأشعة كلها بالبؤرة . وهناك مرايا ذات مقطع مستعرض على هيئة **قطع مكافئ** ولا يوجد بها هذا العيب . وصناعة هذه المرايا أكثر تكلفة من المرايا الكرية ، وإن كان استعمالها شائعًا فى التلسكوبات الفلكية حيث تكون الفتحة العريضة مطلبًا أساسيًا .

23-6 رسم مسارات الأشعة ؛ تكوين الصور بواسطة مرايا كرية مقعرة

هناك ثلاثة أشعة ضوئية - من بين كل الأشعة الضوئية الممكنة - ذات فائدة خاصة فى تحديد موقع نقطة الصورة المناظرة . وهذه الأشعة هى التى ترسم انطلاقًا من نقطة الجسم إلى المرآة . ولقد تناولنا بالفعل أحد هذه الأشعة من قبل : وهو الشعاع الساقط الموازى للمحور الرئيسى والمار قريبًا منه . ونعلم أن هذا الشعاع ينعكس مارًا بالنقطة البؤرية F ، التى تقع عند منتصف المسافة بين مركز انحناء المرآة C والنقطة التى يلتقى فيها المحور الرئيسى بالمرآة . وهذا ما يوضحه الشكل 12-23 (أ) .

والشعاع المهم الثانى هو المار خلال النقطة البؤرية فى طريقه إلى المرآة وينعكس هذا الشعاع بحيث يكون موازيًا للمحور الرئيسى ؛ كما يرى فى الشكل 12-23 (ب) والسبب فى هذا هو أن قانون الانعكاس يظل قائمًا إذا عكسنا اتجاه الشعاع .



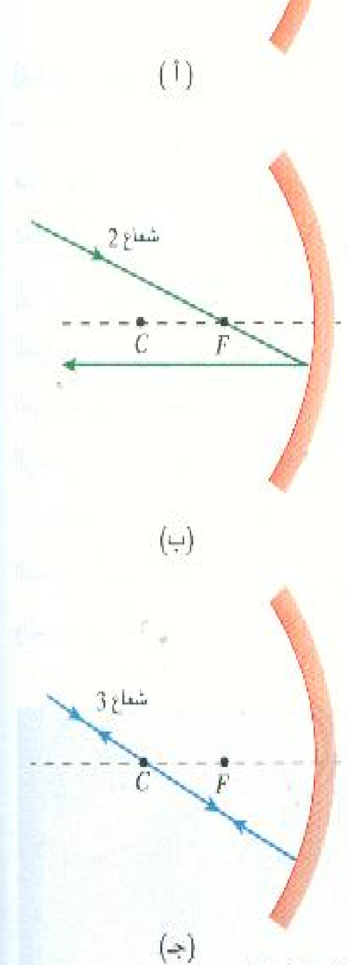
تعكس المرايا المقعرة أشعة الشمس فى بؤرة داخل هذا الفرن الشمسى جنوب فرنسا . وتصل درجة حرارة هذا الفرن إلى ما يزيد عن 4000°C عند بؤرة المرآة .

أما الشعاع الخاص الثالث فهو الذى يمر من الجسم خلال مركز انحناء المرآة عند C وكما يوضح الشكل 12-23 (جـ) فإنه يرتطم بالمرآة عموديًا على سطحها ثم ينعكس مرتدًا على نفسه . وفيما يلى تلخيص للأشعة الثلاثة الخاصة هذه بالنسبة للمرايا المقعرة :

1 ينعكس الشعاع الموازي للمحور الرئيسي بحيث يمر خلال البؤرة .

2 ينعكس الشعاع المار خلال البؤرة بحيث يكون موازيًا للمحور الرئيسي .

3 ينعكس الشعاع المار خلال مركز انحناء المرآة بحيث يرتد على نفسه ليمر خلال مركز انحناء المرآة .



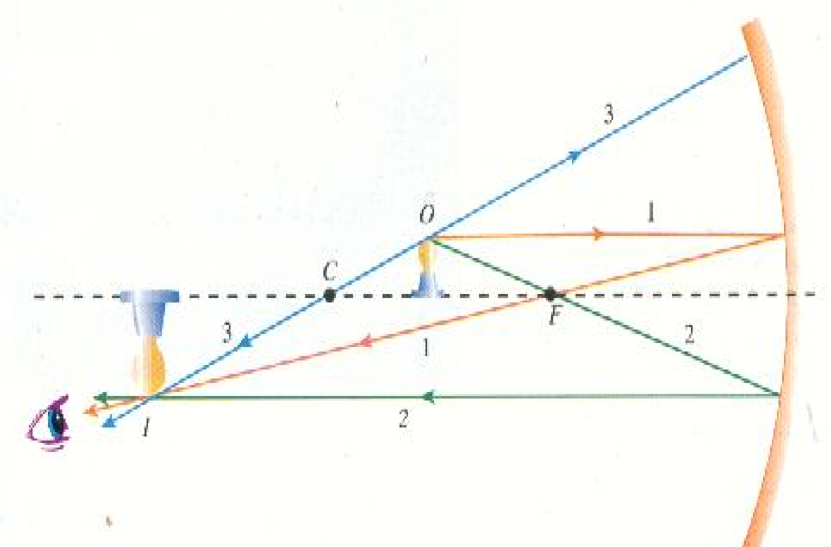
شكل 23-12: الأشعة الخاصة الثلاثة المستخدمة في تحديد موقع الصورة بواسطة مرآة كرية مقعرة .

سنقوم الآن بتطبيق هذه القواعد عند استعمال مسارات الأشعة التي تحدد موضع تكون الصور .

افترض الآن أننا نرغب في إيجاد صورة الجسم O التي تكونها المرآة الموضحة في الشكل 23-13 وليكن هذا الجسم عبارة عن بصيلة إضاءة . وإذا كانت البصيلة تشع الضوء في جميع الاتجاهات ، فإننا لا نحتاج سوى لرسم ثلاثة أشعة منبعثة منها . وهذه الأشعة الثلاثة هي بالضبط تلك التي وصفناها منذ قليل بواسطة القواعد الثلاث وعليك تتبع كل منها لتتأكد من أنها رسمت بشكل صحيح في الشكل 23-13 . وبمجرد تحديد مواضع C و F فإن مسطرة بسيطة تكفي لرسم الأشعة الثلاثة .

وإذا وضعت عينك في الموقع المبين في الشكل 23-13 فستبدو لك الأشعة الثلاثة وكأنها قادمة من النقطة I . وبعبارة أخرى ، فإنك ترى صورة البصيلة الضوئية عند النقطة I . وعلاوة على ذلك ، وحيث أن الأشعة تتجمع بالفعل على النقطة I ثم تخترقها ، فإنك إذا وضعت صفحة من الورق عند I لتكونت عليها صورة مضيئة للبصيلة الأصلية . وهذه إذن صورة حقيقية : **في حالة الصورة الحقيقية فإن الضوء يمر حقيقة خلال الصورة مسترجعًا بذلك شكل الجسم** . ويلاحظ هنا كيف يختلف هذا الوضع عن الصورة التخيلية أو التقديرية التي التقينا بها في حالة المرآة المستوية .

لقد استعملنا الأشعة الثلاثة الخاصة حتى نحدد موقع صورة النقطة I المناظرة للجسم عند النقطة O ، وتمثل كل النقط الأخرى الواقعة على الجسم مصادر إما للضوء المنبعث أو الضوء المنعكس . ولكي نجد نقط الصورة المناظرة للنقط الأخرى على الجسم فإننا نستطيع إجراء نفس الخطوات حتى نحصل في النهاية على صورة الجسم بأكمله . فإذا



شكل 23-13: تتكون صورة حقيقية I للجسم O . تتبع الأشعة الثلاثة الصادرة من الجسم .

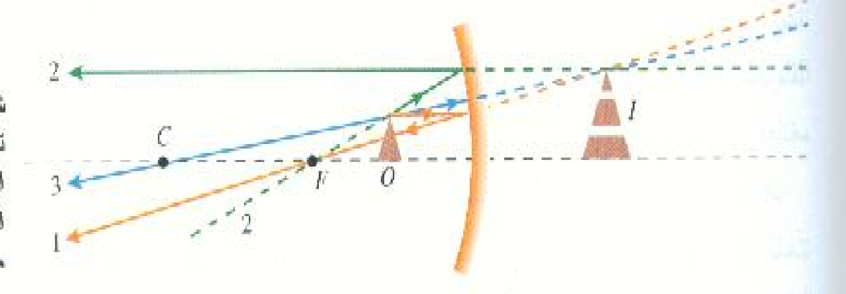
كان الجسم رأسيًا كما فى الشكل 13-23 ، فإننا نتوقع أن كل نقط الصورة سوف تقع على خط رأسى أيضًا وعلى هذا ، إذا تم تحديد موقع نقطة الصورة المناظرة لقمة الجسم ، لأمكن إكمال باقى الصورة .

ونستطيع استخدام مسارات الأشعة هذه للحصول على المزيد من المعلومات حول الصورة وليس مجرد موقعها . وعندما تتجمع الأشعة المنعكسة فيزيائيًا ، كما ذكرنا ، فإن الصورة تكون حقيقية . وإذا وضع حائل أو فيلم فوتوغرافى عند موضع تكون الصورة لاستطعنا تسجيل هذه الصورة الحقيقية . ويلاحظ أيضا أنه فى الشكل 13-23 تتقاطع كل الأشعة المنعكسة مع المحور الرئيسى قبل أن تتجمع لتكون الصورة ، وهذا ما يجعل الصورة تنقلب بالنسبة لجسم . وفى النهاية فإن رسم مسار الأشعة المبين فى الشكل 13-23 يوضح أن الصورة أكبر من الجسم ولذا يقال أن الصورة **مكبرة** ويمكنك بفحص الشكل 13-23 أن تدرك أن الجسم إذا وضع بين C و F فى أماكن مختلفة فإننا نحصل على نفس خصائص الصورة .

سندرس الآن الموقف إذا وضع الجسم عند نقطة أبعد من C ولتكن I مثلاً ، كما فى الشكل 13-23 . ومرة أخرى نستخدم الحقيقة القائلة بأن اتجاه الأشعة يمكن عكسه ، وعندئذ يمكن التحقق من أن الصورة سوف تتكون عند النقطة O . وهذه الصورة ستكون مرة أخرى حقيقية ومقلوبة ولكنها ستكون ذات حجم **أصغر** . ويمكن التحقق من أن خصائص الصورة هذه ستنتج عند أى وضع للجسم خارج النقطة C . والآن سنلخص خصائص الصورة هذه بالنسبة لمرآة مقعرة :

1 عند وضع الجسم بين C و F فإن الصورة تكون حقيقية ومقلوبة ومكبرة .
2 عند وضع الجسم أبعد من C فإن الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغرة .

لنفحص الآن الموقف المبين فى الشكل 14-23 ، حيث يوجد الجسم قريبًا جدًا من المرآة ، أدنى من النقطة F . ومرة أخرى سنقوم برسم الأشعة الثلاثة من طرف الجسم العلوى . على أن الشعاع 2 لن يمر الآن بالنقطة F وهو فى طريقه إلى المرآة وذلك لأن النقطة O أدنى إلى المرآة من النقطة البؤرية F . إن الشعاع لا يزال ينتقل على امتداد الخط المار عبر F ثم ينعكس موازيًا للمحور الرئيسى كالسابق . نتيجة انعكاس الأشعة الثلاثة مختلفة تمامًا عن ذى قبل ، فكما يوضح الشكل 14-23 فإن الأشعة المنعكسة تتفرق كلها عن بعضها البعض . ولن تتجمع مطلقا فى نقطة لكى تكون صورة حقيقية كما حدث فى



شكل 14-23:
تبدو الأشعة الثلاثة كما لو كانت صادرة عن الصورة التقديرية I . يلاحظ بشكل خاص الشعاعان 2 و 3 حتى يمكن رسمهما فى حالات أخرى .




صورة مكونة بواسطة مرايا مقعرة ومحدبة . يلاحظ أن الصورة المبينة فى (أ) مقلوبة بينما الصورة فى (ب) معتدلة . أى الصورتين تقديرية وأيها حقيقية ؟ هل يمكن بواسطة المرآة المقعرة تكوين صورة معتدلة للدمية ؟ وهل يمكن بواسطة المرآة المحدبة تكوين صورة مقلوبة ؟

الشكل 13–23 . على أن أسلوب تفرقها يبدو **كما لو** أنها صدرت مباشرة من نقطة I خلف المرآة . وكما رأينا فى حالة المرآة المستوية فإن شكل الأشعة يمثل ما نطلق عليه صورة تقديرية ويلاحظ أن رسم مسار الأشعة يبين أن الصورة ستكون معتدلة ومكبرة ويمكننا إضافة هذه النتيجة إلى الخاصيتين السابقتين للصورة التى تكونها المرآة المقعرة :

3 إذا وضع الجسم على مسافة أقرب من F فإن الصورة تكون تقديرية ، ومعتدلة ومكبرة .

7–23 معادلة المرآة

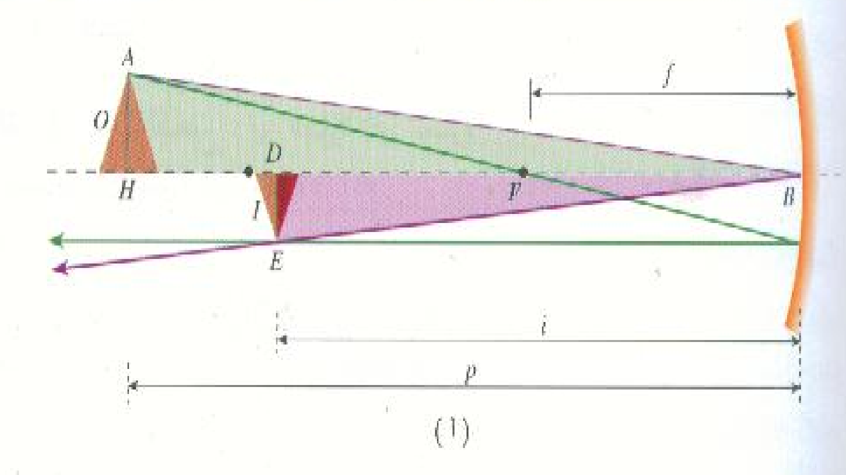
سنرجع إلى الشكل 15–23 لكى نشتق معادلة رياضية تصف موقع الصورة . تسمى المسافة p بين الجسم والمرآة **بعد الجسم** . ويسمى ارتفاع الجسم O . أما ارتفاع الصورة فيسمى I ، والمسافة بين الصورة والمرآة **بعد الصورة** ورمزه i . ويلاحظ أن المسافة BF بين المرآة والنقطة البؤرية هى البعد البؤرى f للمرآة . وليس الشعاع ABE فى الجزء (أ) من الشكل واحدًا من الأشعة الثلاثة الخاصة . على أنه ينعكس بحيث تكون الزاوية ABH مساوية للزاوية DBE . ولهذا السبب فإن المثلثين المظللين ABH و DBE فى الجزء (أ) متشابهان . ولذلك فإن النسبة بين الأضلاع المتناظرة هى :

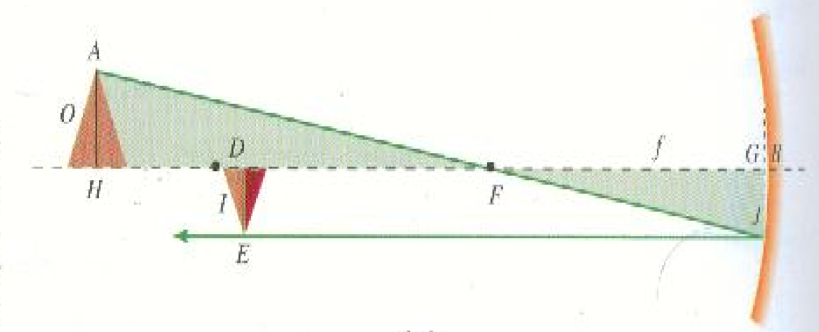
$$\frac{O}{I}=\frac{p}{i}$$

كما أن المثلثين المظللين فى الشكل 15–23 (ب) هما أيضا متشابهان . والمسافتان AH و DE هما ارتفاعا الجسم والصورة على الترتيب .

ويلاحظ أيضًا أن $DE = GJ$. ومن ثم ،

$$\frac{O}{I}=\frac{AH}{DE}=\frac{AH}{GJ}=\frac{HF}{FG}$$





شكل 15-23:
(أ) المثلثان ABH و DBE متشابهان .
(ب) والمثلثان AFH و JFG متشابهان .
وقد اعتبرنا – فى النص – أن انحناء المرآة صغير جدًا لدرجة يمكن معها إهمال المسافة GB .

ولكن HF هى بالضبط $p-f$ و FG هى تقريبًا f . (الفرق بينهما مسافة ضئيلة GB) .
وفى ظل هذا التقريب فإن :

$$\frac{O}{I}=\frac{p-f}{f}$$

وبمساواة هذا المقدار بما وجدناه فى الجزء (أ) فإن :

$$\frac{p}{i}=\frac{p-f}{f}$$

وبقسمة طرفى المعادلة على p وإعادة ترتيب الحدود فإن :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}=\frac{2}{R} \qquad (23\text{-}2)$$

حيث وضعنا $f=R/2$ من المعادلة (1-23) .

تسمى المعادلة 2-23 **معادلة المرآة** ، وهى تتيح لنا حساب المسافة i وهى بعد الصورة عن المرآة وذلك إذا عرف كل من بعد الجسم p عن المرآة والبعد البؤرى f . ومن ناحية أخرى فهذه المعادلة تتيح أيضًا معرفة الموقع الذى يجب وضع جسم ما فيه حتى تكون صورة فى موقع محدد . ويلاحظ فى هذه المعادلة أنها تتضمن جمع **مقادير المقلوبات** . وكما سنرى فإن f و p و i يمكن أن تتخذ قيمًا سالبة أو موجبة فى مواقف مختلفة ، ولذا لابد من توخى العناية عند تطبيق القواعد الجبرية بشكل صحيح .

يلاحظ أنه لحساب الارتفاعات النسبية للجسم والصورة فإن العلاقة $O/I = p/i$ تتحقق كما سبق وبينا . ويطلق على النسبة بين ارتفاع الصورة وارتفاع الجسم مصطلح التكبير الذى تحدثه المرآة :

$$\text{التكبير} = M = \frac{I}{O} = \frac{i}{p} \qquad (23\text{-}3)$$

وكما رأينا من قبل إن كانت I/O أقل من الواحد الصحيح ، فإن الصورة تكون مصغرة . أما إن كانت I/O أكبر من الواحد الصحيح فإن الصورة تكون مكبرة .

مثال 23-1

وضع جسم ارتفاعه 2.0 cm على بعد 30 cm من مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 10 cm . أوجد موقع وحجم الصورة . وهل الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟ حقيقية أم تقديرية ؟

استدلال منطقي :

1

سؤال : كيف يعتمد موقع الصورة على المقادير المعروفة p ، O ، R ؟

الإجابة : تعين R البعد البؤري f (المعادلة 3-23) . ومن ثم تستطيع حل معادلة المرآة (المعادلة 2-23) لتحصل على i .

سؤال : كيف يتحدد حجم الصورة من موقع الصورة ؟

الإجابة : تبين المعادلة 3-23 أن النسبة بين المسافتين i/p هي نفس النسبة بين الحجمين I/O .

سؤال : وكيف يمكنني تحديد ما إذا كانت الصورة أولا ، معتدلة أم مقلوبة وثانيًا إذا كانت حقيقة أم تقديرية ؟

الإجابة : إن الجسم موجود خارج النقطة C وهو الوضع الثاني من الأوضاع الثلاثة الواردة في القسم 6-23 الذي يلخص خصائص الصورة المشتقة من رسم مسار الأشعة .

الحل والمناقشة : البعد البؤري للمرآة هو $f = R/2 = 5.0\ \text{cm}$. وعلى ذلك يكون بعد الصورة هو :

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{5.0\ \text{cm}} - \frac{1}{30\ \text{cm}} = \frac{5}{30\ \text{cm}}$$

وبأخذ مقلوب هذه الكمية فإن :

$$i = \frac{30\ \text{cm}}{5} = 6.0\ \text{cm}$$

ويلاحظ أننا لسنا بحاجة للتحويل إلى أمتار طالما كانت كل المسافات تتخذ نفس الوحدات والتكبير هو

$$M = \frac{i}{p} = \frac{6.0\ \text{cm}}{30\ \text{cm}} = \frac{1}{5}$$

أي أن الصورة قد صغرت إلى خمس حجم الجسم . ولهذا فإن $I = O/5 = \frac{2}{5}\ \text{cm}$.

ويمكنك التأكد من هذا الحل بسرعة إذا رسمت مسار الأشعة .

يبين القسم 6-23 أن الأجسام الموضوعة خارج النقطة C (أبعد منها) تتكون لها صور حقيقية ومقلوبة ومصغرة .

مثال 2-23

وضع جسم على بعد 5.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤرى 10 cm . أوجد موضع الصورة وخصائصها .

استدلال منطقى :

1

سؤال : لقد وضع الجسم على مسافة أقل من البعد البؤرى للمرآة . وأعلم من الشكل 14-23 أن مسار الأشعة لهذه الحالة يؤدى إلى تكون صورة تقديرية . فهل تنطبق معادلة المرآة على هذه الحالة ؟

الإجابة : نعم . تأكد من أنك تتناول العلاقات الجبرية بشكل صحيح . وعندئذ ستدرك كيف تظهر البورة التقديرية فى الإجابة . ومعادلة المرآة فى هذه الحالة هى :

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{(10\ \text{cm})} - \frac{1}{(5.0\ \text{cm})}$$

الحل والمناقشة : تؤدى معادلة المرآة إلى نتيجة سالبة للبعد i

$$\frac{1}{i} = \frac{1-2}{10\ \text{cm}} = \frac{-1}{10\ \text{cm}} \qquad ; \qquad i = -10\ \text{cm}$$

ولهذا يمكننا تحديد نوع الصورة من الإشارة الجبرية للبعد i ، **فإذا كان i موجبًا ، فإن الصورة تكون حقيقية وتقع أمام المرآة . أما إذا كان i سالبًا فالصورة تقديرية وتقع خلف المرآة .**

إن خصائص الصورة لجسم موضوع أقرب من F (القسم 6-23) هى : تقديرية ، معتدلة ، ومكبرة . ويكون التكبير هو : $\frac{I}{O} = \frac{i}{p} = \frac{-10\ \text{cm}}{5.0\ \text{cm}} = -2.0$. ومعنى الإشارة السالبة سيناقش فى القسم التالى . أما الآن فإن هذه النتيجة تدل ببساطة على أن الصورة تبلغ ضعف ارتفاع الجسم .

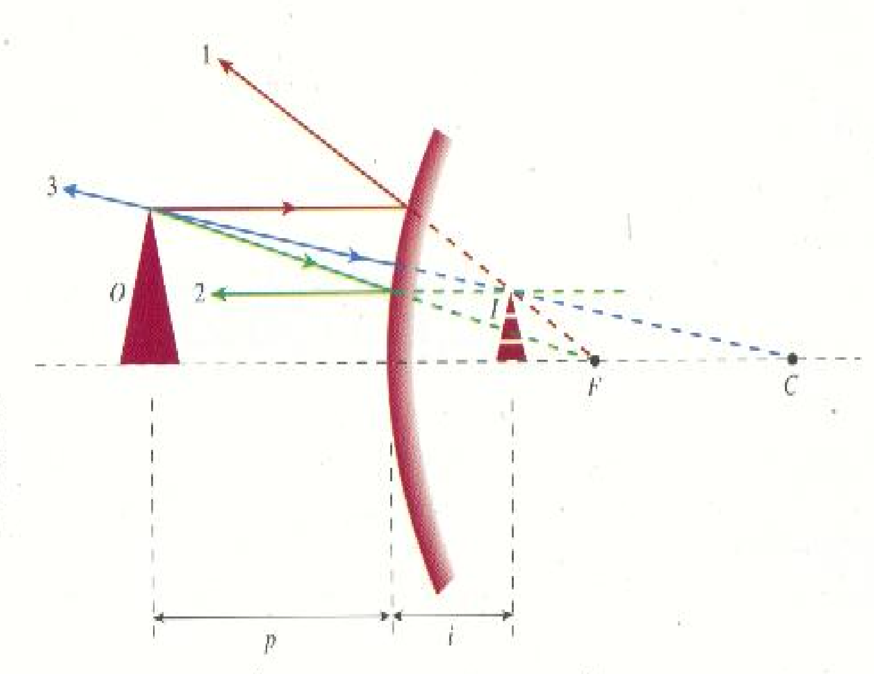
8-23 تكوين الصور بالمرايا المحدبة

المرآة الكرية المحدبة هى جزء من كرة ، يعكس الأشعة من السطح الخارجى كما هو موضح فى الشكل 10-23 (ب) ، حيث نرى كيف تنعكس الأشعة المتوازية من على تلك المرآة . وتبدو الأشعة كما لو كانت متفرقة من نقطة تقع خلف المرآة . **تنعكس الأشعة الساقطة على مرآة محدبة وموازية لمحورها الرئيسى ، كما لو كانت قادمة من النقطة البؤرية** . ولكى نبرهن على ذلك فإننا نسلك نفس الطريق كما فعلنا مع المرآة المقعرة .

بالرجوع إلى الشكل 16-23 فإننا نلاحظ من قانون الانعكاس ومن هندسة الشكل أن عدة زوايا متساوية فيما بينها . والمثلث AFC متساوى الساقين وهكذا فإن $AF = FC$ ، فإذا كان الضلع AB صغيرًا بالمقارنة مع نصف قطر انحناء المرآة فإن AF يساوى

بالتقريب BF . ومن ثم يكون BF مساويًا تقريبًا FC وهنا أيضًا يكون البعد البؤرى فى منتصف المسافة بين المرآة ومركز انحنائها .

شكل 16–23:
ينعكس الشعاع الساقط موازيًا للمحور كما لو كان قادمًا من النقطة البؤرية للمرآة المحدبة .



شكل 17–23:
إن عليك أن تكون قادرًا على رسم الأشعة الثلاثة فى أية حالة بها مرآة محدبة .

نستطيع بناء على ذلك ـ أن نكتب القواعد اللازمة لرسم الأشعة الثلاثة الخاصة بالنسبة **لمرآة محدبة** :

1 ينعكس الشعاع الموازى للمحور كما لو كان قادمًا من النقطة البؤرية (أو البؤرة)
2 ينعكس الشعاع المتجه نحو البؤرة موازيًا للمحور .
3 ينعكس الشعاع المتجه نحو مركز انحناء المرآة مرتدًا على نفسه .

ويوضح الشكل 17–23 هذه الأشعة الثلاثة وعليك تتبعها لتتأكد من أنها تتفق مع هذه القواعد . يلاحظ أن الأشعة الثلاثة المنعكسة تبدو كما لو كانت قادمة من الصورة I خلف المرآة . وكما نرى فالصورة تقديرية ، معتدلة ومصغرة .

إذا رجعنا إلى الشكل 18–23 لاستطعنا أن نحصل على العلاقات الجبرية المستخدمة فى تحديد موقع الصورة بالنسبة للمرآة المحدبة . وعليك إثبات أن المثلث ABH يشبه المثلث EBD فى الجزء (أ) . وأن المثلث IFG يشبه المثلث EFD فى الجزء (ب) . فإذا ثبت أن

هذا صحيح لأمكننا أن نوجد المعادلات التالية مثلما حدث فى معادلة المرآة المقعرة :

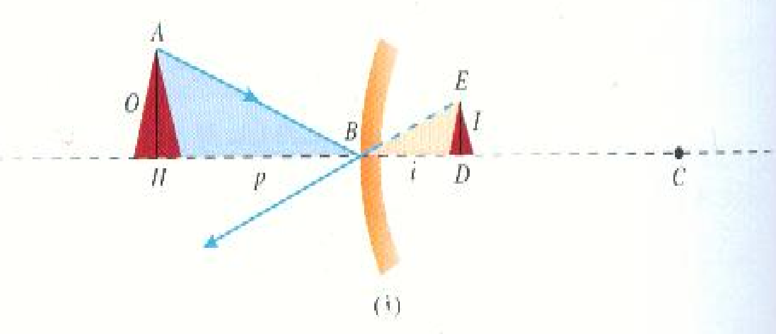
$$\frac{O}{I}=\frac{f}{f-i} \qquad \text{و} \qquad \frac{O}{I}=\frac{p}{i}$$

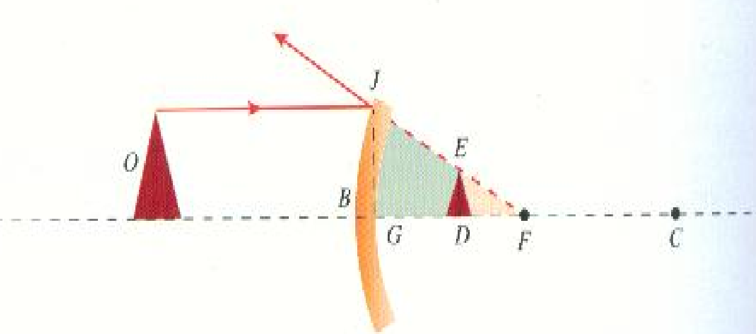
وقد اعتبرنا المسافة BG مهملة جدًا لصغرها ، عند كتابة هذه المعادلات .

بمساواة هاتين المعادلتين وأخذ المقلوب ثم القسمة على i وإعادة ترتيب الحدود نحصل على ما يلى :

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{i}=-\frac{1}{f}$$

يلاحظ أنه ـ بغض النظر عن الإشارات ـ فالمعادلة هى نفسها المعادلة 2-23 للمرآة المقعرة وينبهنا اختلاف الإشارات إلى حقيقة أن الصورة فى هذه الحالة تقع خلف المرآة ، وليس أمامها . وإضافة إلى ذلك فإن الحد المشتمل على البعد البؤرى السالب هو نتيجة إلى أن المرآة محدبة ليست مقعرة .





شكل 23-18:
المثلثان ABH و EBD متشابهان وكذلك المثلثان EFD و JGF وقد افترضنا أن المسافة FG مساوية بالضرورة للمسافة FB .

يمكننا أن نضع قواعد تسمح لنا باستخدام المعادلة 2-23 بالنسبة للمرايا المحدبة أيضًا ، بدلاً من تذكر معادلتى المرآتين . وإذا اتفقنا على أن نجعل بعد الصورة الواقعة خلف المرآة ، أى بعد الصورة التقديرية ، سالبًا دائمًا ، لأمكننا أن نحذف الإشارة السالبة من الحد المشتمل على i فى معادلة المرآة المحدبة . وعلاوة على ذلك ، إذا جعلنا البعد البؤرى للمرآة المحدبة سالبًا دائمًا لأمكننا أن نحذف الإشارة السالبة الأخرى أيضًا . ونستطيع ـ من ثم ـ أن نكتب ما يلى **لجميع** المرايا :

$$\frac{1}{p}=\frac{1}{i}=\frac{1}{f} \qquad \text{للمرايا} \qquad (23\text{-}2)$$

حيث تم الاتفاق على :

1 يكون بعد الجسم موجبًا إذا وقع الجسم أمام المرآة وسالبًا فى أى وضع آخر .

2 يكون بعد الصورة موجبًا إذا وقعت الصورة أمام المرآة (صورة حقيقية) وسالبًا فيما عدا ذلك (صورة تقديرية) .

3 يكون البعد البؤرى موجبًا بالنسبة لمرآة مقعرة وسالبًا لمرآة محدبة .

ونستطيع أن نتوسع فى استخدام قاعدة الإشارات لتحديد ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة بالنسبة للجسم . وسنكتب معادلة التكبير بإشارة سالبة :

$$M = -\frac{i}{p} \qquad \text{(23-3) (أ)}$$

وليس للإشارة الاختيارية التى وضعناها أمام التكبير أى علاقة بالأحجام النسبية للجسم والصورة ، وإن كنا نستطيع أن نستخدمها لتحدد لنا ما إذا كانت الصورة معتدلة أو مقلوبة . ونلاحظ من الأمثلة السابقة أنه عندما تكون الصورة حقيقية فإنها تكون مقلوبة أيضًا ويكون بعد الصورة i موجبًا . وبما أن كلاً من p و i موجبان فإن النسبة $M = -i/p$ تكون سالبة . أما إذا كانت الصورة تقديرية فإنها تكون معتدلة ويكون البعد i سالبًا وهذا يجعل النسبة $M = -i/p$ موجبة . دعنا الآن نلخص هذه المعلومة فيما يلى :

إذا كان التكبير موجبًا فالصورة معتدلة بالنسبة للجسم ، وإذا كان M سالبًا فالصورة مقلوبة .

ويمكنك ملاحظة أنه من المهم جدًا - من المعادلتين 2-23 و 3-23 (أ) - أن نستخدم الإشارات الصحيحة . ومن المهم أيضًا وبنفس الدرجة أن نفسر معنى الإشارات التى تظهر فى نتائج الحسابات .

مثال 3-23

استخدمت مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 100 cm لكى تعكس الضوء الصادر من جسم موضوع على مسافة 75 cm أمام المرآة . أوجد موضع الصورة وتكبيرها . هل الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : لدينا $p = 75$ cm وإذا استطعت أن أعين البعد البؤرى للمرآة ، فيمكن باستخدام المعادلة 2-23 أن أجد i . فكيف إذن أعين f ؟

الإجابة : البعد البؤرى للمرآة هو نصف نصف قطر انحناء المرآة ، ولكن إذا كانت المرآة محدبة فإن $f = -50$ cm فى معادلة المرآة .

سؤال : ما هى المعادلة المستخدمة لإيجاد موضع الصورة ؟

الإجابة : $\frac{1}{i} = \frac{1}{(-50\text{ cm})} - \frac{1}{(75\text{ cm})}$. يلاحظ أن كلاً من الحدين سالب ولذا يكون (i) أيضًا سالبًا .

سؤال : إذا كان i قد أصبح معلومًا فكيف أعين التكبير وكيف أحدد ما إذا كانت

الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

الإجابة : نعلم من المعادلة 3-23 (أ) أن $M = -i/p$. وإذا حسبت M فإن قاعدة الإشارات بالنسبة له سوف تحدد لك ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة .

الحل والمناقشة : عند حل المعادلة 2-23 لإيجاد i ، فإننا نلاحظ أن المقام المشترك هو 150 cm :

$$\frac{1}{i} = \frac{-3-2}{150\text{ cm}} = \frac{-5}{150\text{ cm}}$$

ومنها نجد أن $i = -30$ cm . وتدل الإشارة السالبة على أن الصورة تقديرية وتقع خلف المرآة . وتذكر أن موقع الصورة هذا هو الموقع الذى يبدو وكأن الأشعة تخرج منه متفرقة . والتكبير هو

$$M = -\frac{-30\text{ cm}}{75\text{ cm}} = +0.40$$

أى أن حجم الصورة هو 40 فى المائة من حجم الجسم ، وتحدد الإشارة الموجبة أن الصورة معتدلة .

مثال 4-23

هب أن لديك مرآة مقعرة بعدها البؤرى 40 cm . أين يمكنك وضع جسم ما لتحصل على صورة له على بعد 100 cm أمام المرآة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة التى تربط بين الكميات المعلومة وموقع الجسم ؟

الإجابة : إنها معادلة المرآة :

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{i}$$

سؤال : ما هى الإشارات الصحيحة الواجب استخدامها ؟

الإجابة : يكون f موجبًا دائمًا بالنسبة للمرآة المقعرة ، والصورة المتكونة أمام المرآة تكون حقيقية ويكون i موجبًا .

الحل والمناقشة :

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{40\text{ cm}} - \frac{1}{100\text{ cm}} = \frac{10-4}{400\text{ cm}} = \frac{6}{400\text{ cm}}$$

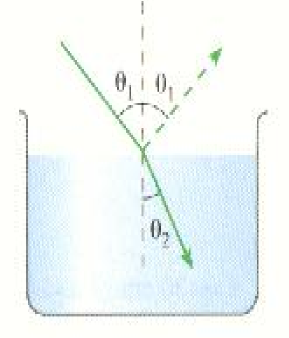
ويعطينا هذا $p = +66.7$ cm . وعليك التحقق من هذه النتيجة برسم مسار الأشعة .

تمرين : إذا كان طول الصورة 2.5 cm فما الطول الواجب أن يكون عليه الجسم .

الإجابة : 1.67 cm .

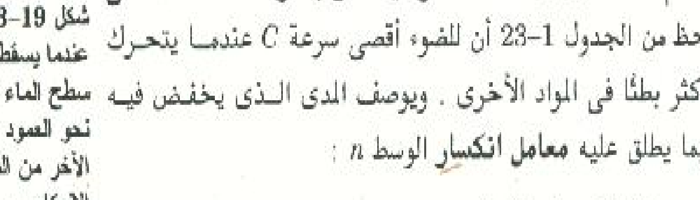
23-9 انكسار الضوء : قانون سنل

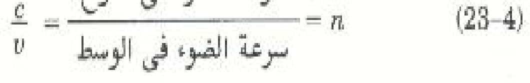
عندما تدخل حزمة من الضوء إلى الماء قادمة من الهواء فإن مسارها ينحني كما هو مبين فى الشكل 19-23 . ويسمى التغير فى اتجاه الشعاع عند مروره من وسط إلى آخر **انكسارًا** . والزاوية θ_1 هى بالطبع زاوية السقوط والزاوية θ_2 تسمى **زاوية الانكسار** . (ينعكس جزء أيضًا من الحزمة من على سطح الماء ، كما هو مبين بالشعاع المتقطع فى الشكل 19-23 وإن كنا سنتجاهل هذا الانعكاس فى القسم الحالى) .



شكل 19-23:
عندما يسقط شعاع ضوئى فى الهواء على سطح الماء فإن جزءًا من الشعاع ينكسر نحو العمود المقام على السطح . أما الجزء الآخر من الشعاع الساقط فيتبع قانون الانعكاس .

والسبب الأساسى وراء تغير اتجاه الشعاع عند انتقاله من وسط شفاف إلى وسط شفاف آخر هو كما ذكرنا فى القسم 2-23 من أن **انتقال الضوء ينتقل بسرعات مختلفة فى الأوساط المختلفة** . ونلاحظ من الجدول 1-23 أن للضوء أقصى سرعة C عندما يتحرك فى الفراغ وأنه يتحرك أكثر بطئًا فى المواد الأخرى . ويوصف المدى الذى يخفض فيه الوسط من سرعة الضوء بما يطلق عليه **معامل انكسار** الوسط n :





$$\frac{c}{v} = \frac{\text{سرعة الضوء فى الفراغ}}{\text{سرعة الضوء فى الوسط}} = n \qquad (23\text{-}4)$$

الجدول 2-23 : معاملات الانكسار عند طول موجى مقداره 589 nm :

المادة	$c/v = n$	المادة	$c/v = n$
الهواء*	1.0003	زجاج كراون	1.52
الماء	1.33	كلوريد الصوديوم	1.53
إيثانول	1.36	بولى ستيرين	1.59
أسيتون	1.36	ثنائى كبريتيد الكربون	1.63
الكوارتز المنصهر	1.46	زجاج فلنت	1.66
البنزين	1.50	يوديد ميثيلين	1.74
اللوسيت أو البلكسيجلاس	1.51	الألماس	2.42

* عند معدلى الضغط ودرجة الحرارة .



من مظاهر إدراك الانكسار أن أنبوبة الامتصاص تبدو وكأنها تنحنى عندما تدخل فى الماء .

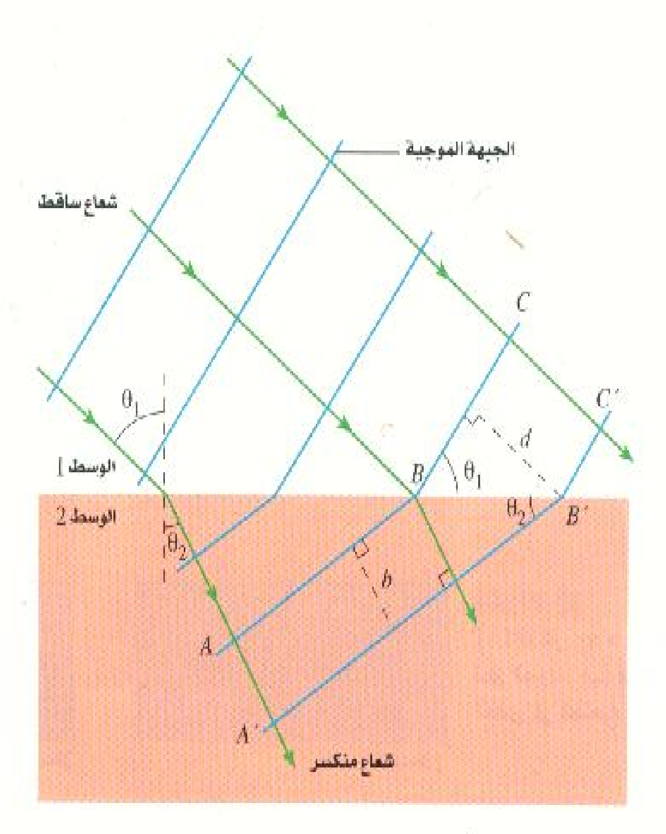
ومعامل الانكسار أكبر من الواحد دائمًا لأن الضوء يسير بأقصى سرعة فى الفراغ ويحتوى الجدول 2-23 على قيم نموذجية لمعامل الانكسار n ، حيث يلاحظ أن معامل الانكسار يقترب من الواحد الصحيح بالنسبة للهواء فى حين يكون معامل الانكسار كبيرًا بالنسبة للألماس وهو 2.42 . ومن الطبيعى أن معامل انكسار الفراغ هو واحد صحيح تمامًا ويتغير معامل الانكسار بشكل طفيف بتغير الطول الموجى للضوء كما سنرى فيما بعد وتكون قيمته أكبر للضوء الأزرق بالنسبة للقيمة عند الضوء الأحمر .

من المناسب دراسة حركة الجبهات الموجية لموجة مستوية كما هو مبين فى الشكل 20-23 لكى نصل إلى علاقة بين زاوية السقوط θ_1 وزاوية الانكسار θ_2 . سنفترض أن سرعة الموجة v_1 فى الوسط 1 ، و v_2 فى الوسط 2 بحيث كانت v_1 أكبر من v_2 . وسيكون

للجبهات الموجية انحناءة عند السطح البينى للوسطين لأن الموجة تتحرك ببطء أكبر فى الوسط 2 عنها فى الوسط 1 .

افترض أنه يلزم وقت مقداره t لكى تنتقل جبهة الموجة ABC إلى الوضع $A`B`C`$ ولهذا فالمسافة التى تتحركها الجبهة الموجية فى الوسط 2 فى زمن مقداره t هو $b = v_2t$ والمسافة التى تتحركها الجبهة الموجية فى الوسط 1 هو $d = v_1t$. فإذا قسمنا d على b لوجدنا أن :

$$\frac{d}{b} = \frac{v_1}{v_2}$$



شكل 20–23:
بما أن الموجة تنتقل بشكل أبطأ فى الوسط 2 عنها فى الوسط 1 ، فإن المسافة $AA`$ تكون أصغر من المسافة $CC`$.

ونلاحظ فى الشكل بالإضافة إلى ذلك أن :

$$\frac{d}{BB`} = \sin\theta_2 \qquad \text{و} \qquad \frac{d}{BB`} = \sin\theta_1$$

وإذا قسمنا إحدى المعادلتين على الأخرى نجد أن :

$$\frac{d}{b} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

وحيث أن $\frac{d}{b} = \frac{v_1}{v_2}$ ؛ إذن

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \qquad (23\text{-}5)$$

وقد عرفنا من تعريف معامل الانكسار أن $v = c/n$ ولذا يمكننا إعادة كتابة المعادلة (23-5) كالتالى :

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{c/n_1}{c/n_2}=\frac{n_2}{n_1}$$

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة لتصبح

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (23\text{-}6)$$

وهو ما سنشير إليه بأنه **قانون سنل** . وهناك طريقة سهلة لتذكر قانون سنل وهي :

عندما يعبر الضوء الحدود بين وسط وآخر فإن حاصل الضرب $n \sin\theta$ يظل ثابتًا .

وعلينا تذكر أن زاويتي السقوط والانكسار تقاسان دائمًا بالنسبة **للعمود** المقام على الحد الفاصل بين الوسطين .

نستطيع من ملاحظة المعادلة 6-23 أنه لو كان n_2 أكبر من n_1 ، فإن $\sin\theta_1$ سيكون أكبر $\sin\theta_2$ مما يعني أن θ_1 أكبر من θ_2 . وهذه هي الحالة المبينة في الشكل 21-23 (أ) . إلا أنه قد يحدث أحيانًا أن نهتم بالحالة العكسية ، حيث n_2 أصغر من n_1 . وهي حالة حزمة ضوئية تنتقل من الزجاج إلى الهواء مثلاً ، وفي هذه الحالة فإن المعادلة 6-23 ستتنبأ لنا بأن θ_2 أكبر من θ_1 كما هو مبين في الشكل 21-23 (ب) .

شكل 21-23:
(أ) إذا كان $n_2 > n_1$ فإن الشعاع يميل نحو العمود . (ب) إذا كان $n_2 < n_1$ فإن العكس هو الصحيح .

إذا كان $n_2 > n_1$ فإن الشعاع ينحني نحو العمود ، أما إذا كان $n_2 < n_1$ فإن الشعاع يبتعد عن العمود .

علينا ملاحظة حالة خاصة مهمة تتعلق **بالسقوط العمودي** $(\theta_1 = 0)$ ، حيث يصبح حل المعادلة 6-23 في هذه الحالة هو $\theta_2 = 0$ بغض النظر عن قيم v_2 و v_1 التي لدينا وعموما فإن :

لا يغير الضوء الساقط عموديًا على السطح الفاصل بين وسط وآخر من اتجاهه عند دخوله إلى الوسط الثاني .

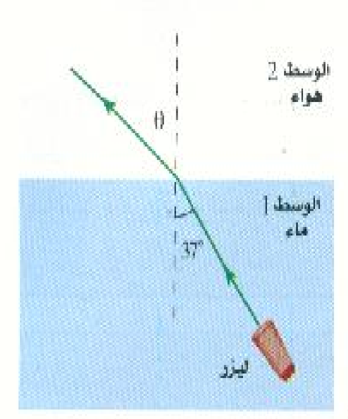
مثال توضيحي 1-23

يوجه أحد الغواصين شعاع ليزر من تحت الماء إلى أعلى بزاوية مقدارها °37 مع الاتجاه الرأسي . ما هي الزاوية التي يخرج بها الشعاع إلى الهواء ؟

استدلال منطقى : يوضح الشكل 22-23 الحالة المذكورة . ويلاحظ أن الوسط 1 هو الماء والوسط 2 هو الهواء . بتطبيق قانون سنل ومعرفة $n_1 = 1.33$ و $n_2 = 1.00$ (من الجدول 2-23) ، فإن :

$$1.33 \sin 37° = 1.00 \sin \theta$$
$$\sin \theta = 0.80$$
$$\theta = 53°$$

تمرين : أوجد زاوية الانكسار فى الماء بالنسبة لضوء يدخل إلى الماء من الهواء بزاوية سقوط مقدارها 53° . **الإجابة :** 37° .

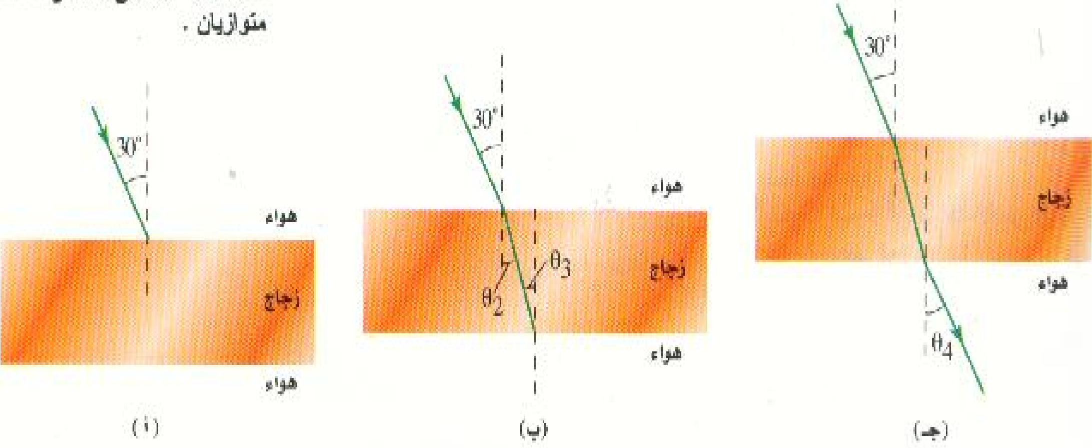


شكل 22-23:
يبعث الليزر الموجود تحت الماء شعاعًا ينحنى بعيدًا عن العمود عند خروجه إلى الهواء .

مثال 5-23 :

يسقط الضوء من الهواء بزاوية مقدارها 30° بالنسبة للعمود ، على شريحة من زجاج كراون لها سطحان متوازيان كما هو مبين فى الشكل 23-23 (أ) . ما هى زاوية خروج الضوء من السطح السفلى للزجاج إلى الهواء ؟

شكل 23-23:
ضوء يمر عبر لوح زجاجى له سطحان متوازيان .



استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يحدد اتجاه الشعاع الخارج ؟

الإجابة : ينطبق قانون سنل على النقطة التى يخرج منها الشعاع عند السطح السفلى والشكل 23-23 (ب) تخطيط لمسار الشعاع أثناء اختراقه للزجاج وعليك إيجاد الزاوية θ_3 التى يسقط بها الضوء على السطح السفلى للشريحة .

سؤال : ما هى العلاقة بين θ_3 و θ_2 ؟

الإجابة : بما أن سطحى الشريحة متوازيان فإن $\theta_3 = \theta_2$.

سؤال : ما علاقة θ_2 بزاوية السقوط الأصلية ؟

الإجابة : من قانون سنل : $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin 30°$.

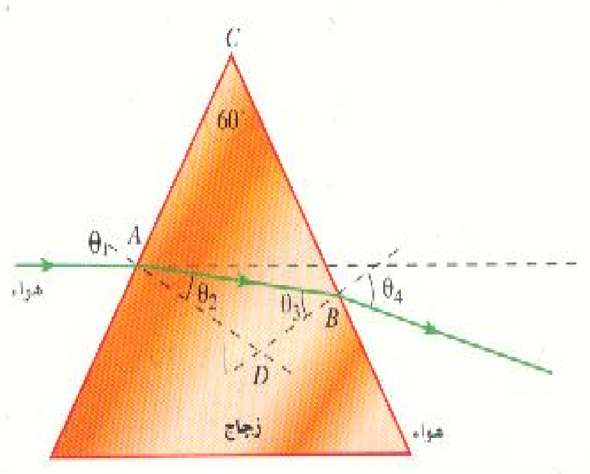
الحل والمناقشة : بأخذ كل العلاقات المذكورة فى الاعتبار نجد أن

$$\sin \theta_4 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 = \frac{n_2}{n_1} \times \frac{n_1}{n_2} \sin 30° = \sin 30°$$

وعلى هذا تكون $\theta_4 = 30°$ مما يشير إلى أن الضوء يخرج من الزجاج فى نفس الاتجاه الذى دخل به . ويمكننا تعميم هذه النتيجة فى حالة أي عدد من الطبقات التى تحددها جوانب متوازية . والشعاع يتحرك حركة جانبية ولكنه لا يغير اتجاهه عندما يعود إلى نفس الوسط الذى بدأ منه .

مثال 6-23

يسقط الشعاع الموضح فى الشكل 24-23 على منشور متساوى الأضلاع وفى اتجاه يوازى قاعدة المنشور المصنوع من كوارتز منصهر . أوجد الزاوية θ_4 التى يصنعها الشعاع الخارج مع العمود المقام على الوجه الأيمن للمنشور .



شكل 24-23: ينحرف الضوء عن اتجاهه الأصلى بواسطة كل من وجهى المنشور .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى الزاوية التى ترتبط بها θ_4 من خلال قانون سنل ؟

الإجابة : يربط قانون سنل θ_4 مع θ_3 :

$$\sin \theta_4 = \frac{n_{air}}{n_{quartz}} \sin \theta_3$$

وتقاس كلتا الزاويتين بالنسبة للعمود المرسوم خلال النقطة B فى الشكل 24-23 .

سؤال : كيف يمكن إيجاد θ_3 ؟

الإجابة : عليك بتذكر بعض الهندسة . أولاً ، مجموع زوايا المثلث 180° بحيث ،

$$\theta_2 + \theta_3 + D \text{ الزاوية } = 180°$$

كما أن مجموع زوايا الشكل الرباعى (الذى تحدده أربعة أضلاع) هو 360° وبالنظر إلى الشكل الرباعى $ACBD$ نجد أن كلاً من الزاويتين A و B هو 90° أما الزاوية C فهى 60° من المعطيات . ولهذا تصبح الزاوية $D = 120°$. وبدمج هذه النتيجة مع المعادلة السابقة نصل إلى العلاقة بين θ_2 و θ_3 :



$$\theta_2 + \theta_3 = 180° - 120° = 60°$$

سؤال : ما الذى يحدد θ_2 ؟

الإجابة : نطبق قانون سنل على النقطة A فنحصل على θ_2 إذا كانت θ_1 معروفة وحيث أن كل زاوية من زوايا المنشور $60°$ والشعاع الساقط يوازى القاعدة فلابد إنك تستطيع استنتاج أن $\theta_1 = 30°$.

الحل والمناقشة : سنحصل أولاً على n_{quartz} من الجدول 2-23 ، وإذا بدأنا بالزاوية θ_1 نحصل على θ_2 :

$$\sin\theta_2 = \frac{1.00}{1.46}\sin 30° = 0.342$$

$$\theta_2 = 20.0°$$

إذن :

$$\theta_3 = 60° - 20.0° = 40.0°$$

$$\sin\theta_4 = \frac{1.46}{1.00}\sin 40.0° = 0.934$$

$$\theta_4 = 69.8°$$

تحقق من فهمك للسبب فى أن الشعاعين عند A و B ينحنيان كما هو مبين فى الشكل 23-24 .

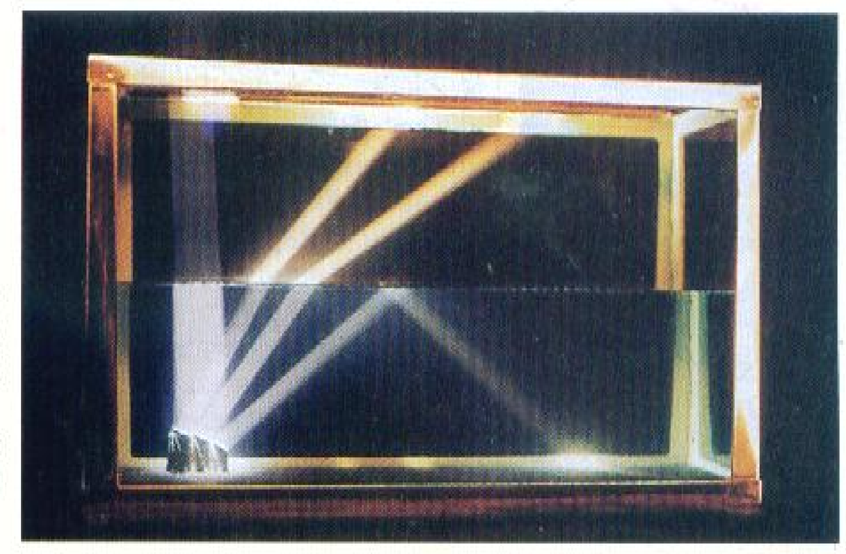
تمرين : افترض أن نفس المنشور المصنوع من كوارتز منصهر قد أحيط بزجاج فلنت بدلاً من الهواء . ارسم تخطيطيًا مسار نفس الشعاع الساقط خلال المنشور .

الإجابة : (cmh,6p)

23-10 الانعكاس الداخلى الكلى

يدين الألماس بقدر كبير من جماله لظاهرة بصرية تسمى **الانعكاس الداخلى الكلى** . وهذه الظاهرة مسئولة أيضًا عن قدرة الألياف الزجاجية على حمل الضوء وتوجيهه من خلال المنحنيات والمنعطفات . وتستخدم هذه الألياف البصرية فى كثير من التطبيقات العملية المهمة ومنها أجهزة الألياف البصرية التشخيصية فى الطب وكابلات الألياف البصرية التى خلقت ثورة فى عالم الاتصالات ولا تزال فى حالة تطور .

ولكى نفهم الانعكاس الكلى الداخلى سنبدأ بدراسة عملية مرور الضوء من وسط إلى وسط ثان معامل انكساره **أصغر** من الأول ويبين الشكل 25-23 مثلاً ، مصدرًا ضوئيًا O يقع تحت سطح بركة ماء . وعندما يمر الشعاع B من الماء إلى الهواء فإنه ينكسر مبتعدًا عن العمود المقام على سطح الماء . ومن الطبيعى أن يحدث بعض الانعكاس أيضًا عند السطح وهكذا يكون B' هو الشعاع المنعكس . وتنقسم الطاقة التى يحملها الشعاع الساقط



تنكسر أشعة الضوء القادمة من وسط معامل انكساره أكبر فى قاع الإناء إلى وسط معامل انكساره أقل ، فتنحنى مبتعدة عن العمود المقام على الحد الفاصل . وإذا كانت زاوية السقوط كبيرة بما يكفى فلن يكون هناك شعاع منكسر وينعكس الشعاع الساقط كليا .

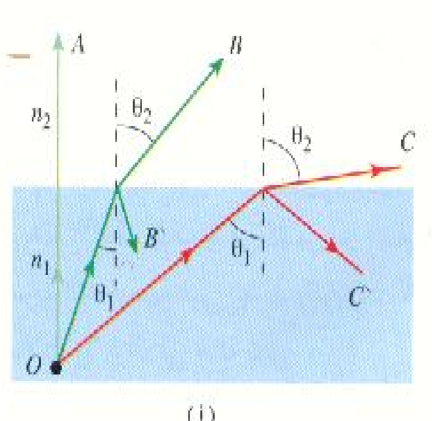
بين الشعاع المنكسر والشعاع المنعكس . وسنفحص الآن شعاعًا آخر C ساقطًا بزاوية أكبر من العمود . والشعاع المنعكس C' سوف يحمل جزءًا من الطاقة الساقطة أكبر مما يحمل الشعاع B' الذى انعكس فكان أقرب إلى العمود .

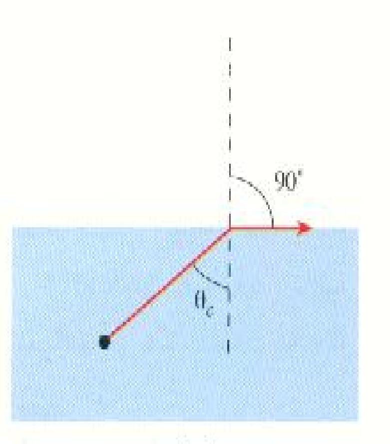
على أن هناك شعاعًا فاصلاً ، يبينه الشكل 25-23 (ب) بحيث يكون الشعاع المنكسر المناظر له موازيًا للسطح $(\theta_2 = 90°)$. ويحدث هذا عند **زاوية حرجة** للسقوط هى θ_c . فإذا كانت زاوية السقوط أكبر من θ_c فلن يكون هناك شعاع منكسر . وينعكس **كل** الضوء الساقط مرة أخرى داخل الماء مكونًا انعكاسًا داخليًا كليًا . ويعطينا قانون سنل قيمة الزاوية الحرجة بالنسبة لأى زوجين من الأوساط :

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90° = n_2\, 1.00$$

ولذلك

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{أو} \qquad \theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} \tag{23-7}$$





شكل 25-23:
عندما تكون θ_1 أكبر من الزاوية الحرجة θ_2 فإن الشعاع يعانى من انعكاس داخلى كلى .

من المهم جدًا تذكر أن الانعكاس الداخلى الكلى لا يحدث إلا إذا كان $n_1 > n_2$. وحيث أنه لا توجد زاوية لها جيب أكبر من الواحد لذا فليس للمعادلة 7-23 حل إلا إذا كانت $n_1 > n_2$.

عندما يكون الوسط 2 هواء فيمكن التحقق بسهولة أى $\theta_c = 49°$ للماء و $41°$ لزجاج



تعرض الصورة بوضوح مقـدرة الأليـاف البصرية على احتواء وتوصيل الضوء من خلال الانعكاس الداخلى . وعندما ينشتت كسر صغير من ضوء الليزر الداخل إلـى هذه الليفة بواسطة بعـض الاضطرابات الميكروسكوبية فى الليفة وسطحها ، فـإن الليفة نفسها تصبح مرئية . وتلاحظ الشدة الكبيرة للضوء المنقول عبر الألياف والتى تخرج من الطرف الآخر لها لكـى تصنع بقعة ضوئية على الأرض عنـد الطـرف السفلى الأيمن للصورة .

قلنت و °24.4 للألماس . والضوء القادم من أية جهة يمكنه دخول الألماس (وليست هناك زاوية حرجة للضوء حتى ينكسر داخل أية مادة معامل انكسارها أكبر من ذلك) ولكن الضوء الذى يخرج من الألماس لابد أن يخرج بزوايا قريبة من العمود المقام على أحد أوجه الألماس . ولـهذا ينعكس الضوء داخليًا عدة مرات قبل أن يخرج . ويقوم صانعوا الألماس بقطع أوجه كثيرة جدًا فى كل قطعة ألماس . ولأن الضوء يتعرض لكثير من الانعكاسات الداخلية لذا فإن كل وجه يستقبل فى النهاية جزءًا من الضوء الساقط بزاوية أصغر من °24.4 . وعندما تدير قطعة من الألماس فى يدك ستأخذ فى التلألـؤ لأن الضوء الذى تراه يخرج متعامدًا تقريبًا مع كل من الأوجه العديدة .

مثال توضيحى 2-23

يوضح الشكل 26-23 ضوءًا ساقطًا على منشور قائم الزاوية ومتساوى الساقين من الزجاج . أثبت أن الضوء يعانى من انعكاس داخلى كلى ويخرج بزاوية °90 مع اتجاهه الأصلى . اعتبر المنشور محاطًا بالـهواء .

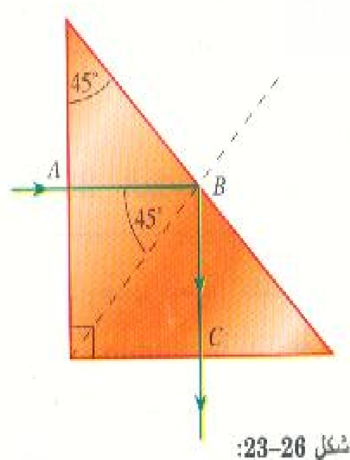
استدلال منطقى :

يدخل الضوء إلى المنشور دون أى انحناء عند النقطة A لأنه يرتطم بالسطح بامتداد العمود ($\theta_1 = 0°$) . وحيث أن زاويتين بالمنشور مقدار كل منهما °45 فإن زاوية السقوط عند النقطة B تكون °45 . والزاوية الحرجة للحد الفاصل بين الزجاج والـهواء هى $\sin^{-1}(1/1.52) = 41.1°$. ولـهذا لا يمكن لأى جزء من الشعاع الساقط أن ينكسر إلى الـهواء عند B . وزاوية الانعكاس عند B تساوى زاوية السقوط أى أن الشعاع سينعكس بنسبة مائة فى المائة وبزاوية مقدارها °90 بالنسبة لاتجاهه الأصلى . ويرتطم هذا الشعاع بالحد الفاصل بين الزجاج والـهواء عند النقطة C على طول اتجاه العمود ولـهذا فهو يخرج قائمًا خلال الحد كما هو مبين فى الشكل 26-23 .

إن الانعكاس الداخلى هو بالفعل كلى ، بل إنه أكثر كمالاً من الانعكاس من على أى سطح مفضض . ويستخدم هذا النوع من المناشير فى صناعة المناظير ثنائية العينية (المناظير المعظمة) لكى يحدث تحولاً دقيقًا مقداره زاوية قائمة فى مسار الضوء .

تمرين : إذا غمس المنشور فى الماء ، فهل سيظل الضوء معرضًا للانحناء بزاوية قائمة ؟

الإجابة : إن الزاوية الحرجة للحد الفاصل بين الزجاج والماء هى °61 (إثبت ذلك) ، ولذلك لابد أن يوجد شعاع منكسر داخل الماء عند النقطة B . كما أن بعض الضوء سينعكس كالسابق وإن كانت شدته ستكون منخفضة جدًا .

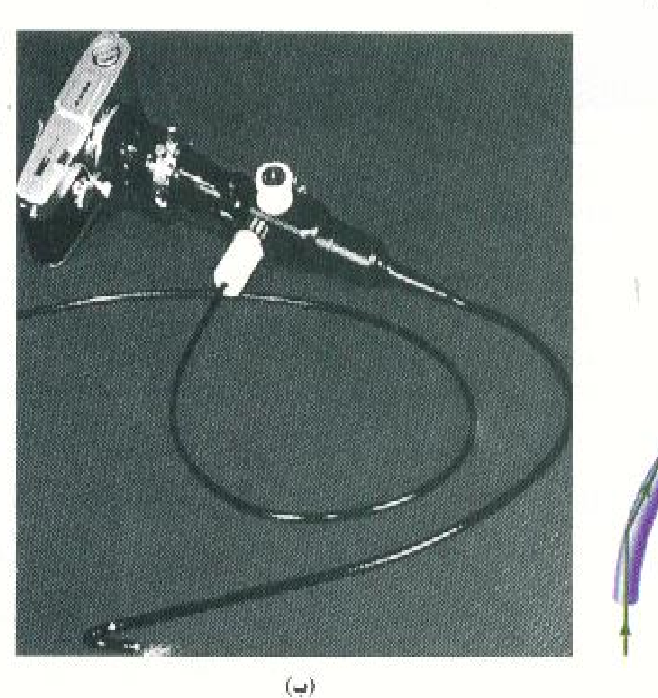


شكل 26-23:
يعانى الضوء الساقط عموديًا علـى أحد أوجه منشور قائم الزاوية مـن انعكاس داخلى كلى ويخرج بزاوية مقدارها °90 مع الاتجاه الأصلى .

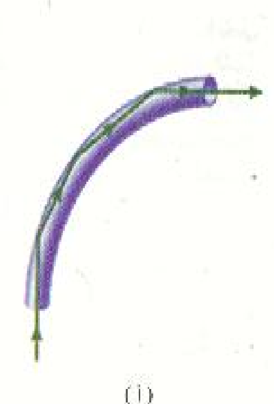
وتتيح ظاهرة الانعكاس الداخلى ضخ الضوء خلال « أنابيب » من خلال المنعطفات . فالضوء الذى يدخل طرف قضيب ذى انحناءة خفيفة يعانى من انعكاس داخلى كلى حول المنحنى كما هو مبين فى الشكل 27-23 (أ) . وعندما تستخدم مجموعة من هذه القضبان المنحنية (وهو ما اصطلح على تسميته **الألياف البصرية**) فإن الصورة المركبة

لجسم ما يمكن نقلها خلال الأنبوبة من مكان إلى آخر . وتسمى مثل هذه النبيطة أنبوبة ضوئية (الشكل 27-23 (ب)) .

تستخدم فى السنوات الأخيرة - الألياف البصرية فى مجال الاتصالات البعيدة ، حيث تقوم حزم من أشعة الليزر بنقل الإشارات الكهربية بدلاً من نقلها بالتيارات الكهربية والموجات اللاسلكية بالطرق التى كانت تستخدم قديمًا فى شركات التليفون . وقد أصبح هذا التطبيق ميسورًا بصناعة ألياف ذات فاقد طفيف جدًا فى الطاقة . ولأن تردد الموجات الضوئية أكبر بكثير جدًا من تردد التيارات الكهربية والموجات اللاسلكية فإن كمية أكبر بكثير من المعلومات يمكن نقلها فى وحدة الزمن بواسطة حزمة بصرية داخل ليفة مقارنة بما ينقل عبر أسلاك تقليدية أو بواسطة حزمة مقاربة لها من الموجات اللاسلكية (الراديو) .



(ب)



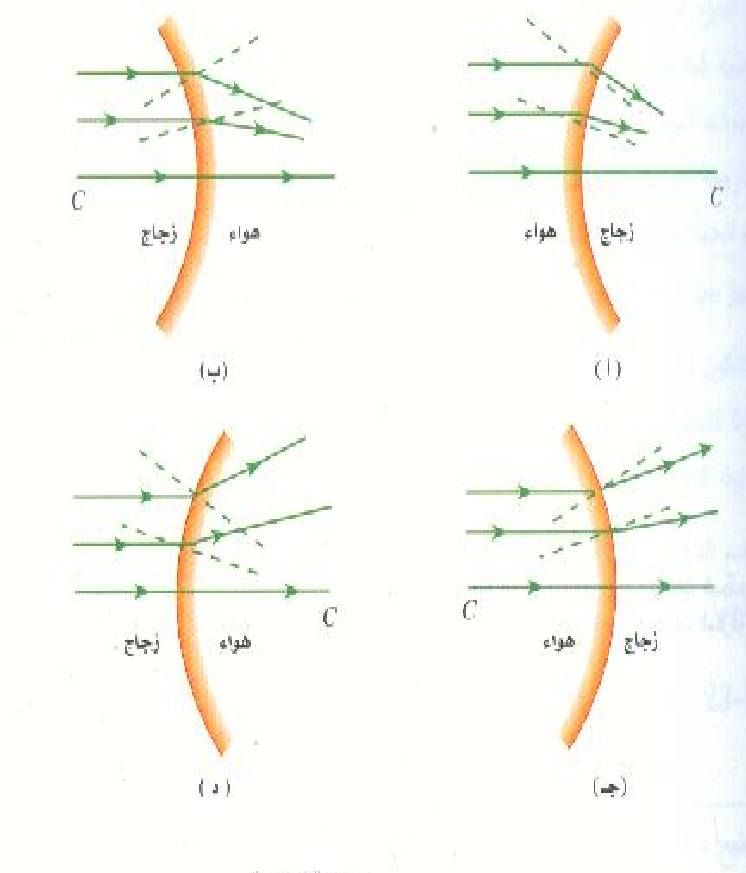
(أ)

شكل 27-23:
(أ) يدفع الضوء إلى المرور عبر ليفة زجاجية بواسطة الانعكاس الداخلى الكلى . (ب) منظار البطن (جاستروسكوب) ويرى متصلاً بآلة تصوير . ويقوم مصدر للضوء (خارج نطاق الصورة إلى اليسار) بتوفير الضوء لحزمة الألياف أسفل الصورة . ويتم إدخال أنبوبة الضوء عبر حلق المريض إلى داخل المعدة . والضوء المنعكس من على جدار المعدة ينعكس عبر الألياف الوسطى للحزمة مكونًا صورة على الفيلم الحساس بآلة التصوير . وكثيرًا ما يستغنى عن آلة التصوير ويلاحظ الضوء بالعين المباشرة (الهيئة البصرية الأمريكية ، قسم الألياف البصرية) .

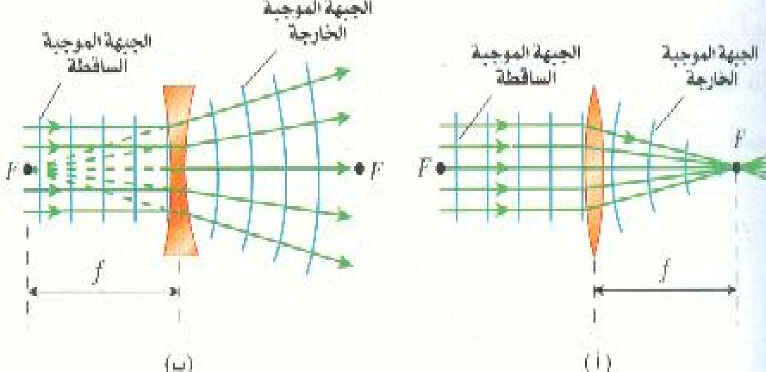
23-11 العدسات الكرِّية

لقد وجدت ظاهرة الانكسار أكثر تطبيقاتها فائدة فى العدسات ومقدرتها على تكوين الصور . وتستطيع عدسة مصنوعة جيدًا أن تركز حزمة من الأشعة الضوئية المتوازية فى منطقة صغيرة عند نقطة بؤرية . ولكى ندرك هذا سنفحص كيف ينطبق قانون سنل على انكسار الضوء الساقط على سطح كرى .

يوضح الشكل 28-23 مقاطع مستعرضة لكرات زجاجية وكذلك بعض الأشعة الساقطة عليها وهى موازية للمحور الرئيسى للكرات . ويرمز لمركز انحناء الكرات فى كل حالة بالنقطة C . ونلاحظ بشكل عام أن تأثير الانكسار عند نقطة مختلفة على السطح هو إما تجميع للأشعة نحو المحور (كما فى الشكلين 28-23 (أ) و (ب)) وإما تفريق الأشعة بعيدًا عن المحور (كما فى الشكلين 28-23 (جـ) و (د)) . وعلى الرغم من أن



شكل 28-23:
الانكسار عند نقط مختلفة على الحد الكرى الفاصل بين الهواء والزجاج .



شكل 29-23:
(أ) تتجمع الأشعة المتوازية فى النقطة البؤرية بواسطة العدسة المجمعة . (ب) وتتفرق وتبدو كما لو كانت قادمة من النقطة البؤرية لعدسة مفرقة .

الأشعة مرسومة بالنسبة للنصف العلوى فقط للأسطح إلا أن الموقف متماثل وهناك أشعة لم ترسم ترتطم بالجزء السفلى أيضًا .

سنقوم الآن بعمل عدستين عن طريق ضم سطحين الشكلين 28-23 (أ) و (ب) وضم سطحى الشكلين 28-23 (جـ) و (د) ، والشكل 29-23 يوضح النتيجة . دعنا نطلق على جانب العدسة الذى يتلقى الأشعة الساقطة « جبهة العدسة » أما الجانب الذى يحتوى على الأشعة المنكسرة « ظهر » العدسة . وعلى الرغم من أننا لا نلجأ للبراهين هنا إلا أنه عند استعمال جزء صغير من السطح الكرى فإن الأشعة المنكسرة فى الشكل 29-23 (أ) ستتجمع فى النقطة F خلف العدسة والأشعة فى الشكل 29-23 (ب) ستتفرق على هيئة بحيث تبدو كما لو كانت قادمة من النقطة F أمام العدسة . . ولهذا يطلق على هاتين العدستين **مجمعة (لامة) ومفرقة** على الترتيب . وتسمى النقط F بالنقطة البؤرية للعدسات والمسافة f ما بين مركز العدسة إلى النقطة F مقاسة على طول المحور

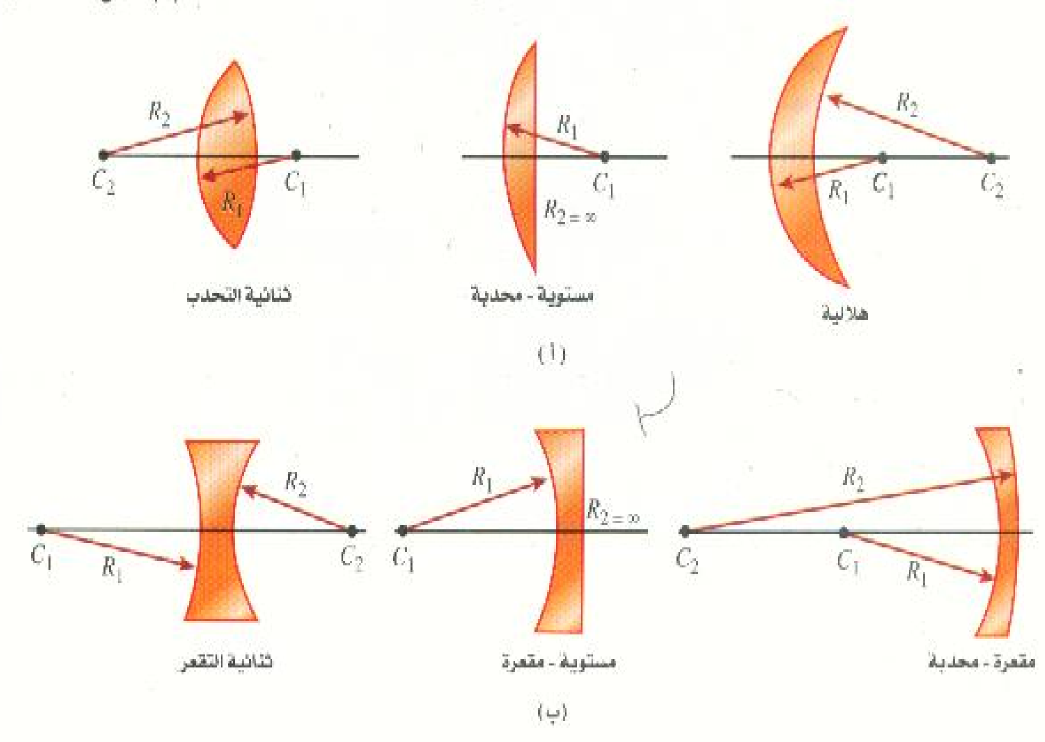
الرئيسى هى البعد البؤرى للعدسة *

النقطة البؤرية (البؤرة) لعدسة مجمعة هى النقطة التى تلتقى عندها الأشعة الساقطة فى اتجاه يوازى المحور الرئيسى بعد مرورها عبر العدسة . أما بؤرة العدسة المفرقة فهى النقطة التى تبدو الأشعة الساقطة فى اتجاه يوازى المحور الرئيسى وكأنها تتفرق من عندها بعد مرورها عبر العدسة .

وحيث أن الضوء يستطيع النفاذ من العدسة فى كلا الاتجاهين ، فإن للعدسة بؤرتين واحدة على كل جانب . وإذا كانت العدسة **رقيقة** ، أى إذا كان سمكها أقل كثيرًا من بعدها البؤرى فإن البؤرتين تقعان على مسافتين متساويتين على جانبى العدسة .

وهناك طريقة بديلة لوصف الخاصية الانكسارية للعدسة . لقد تعلمنا فيما سبق أن الانكسار عند سطح فاصل هو نتيجة اختلاف سرعة الضوء فى كل من الوسطين فالجزء الأوسط من الموجة المستوية الساقطة فى حالة العدسة اللامة يقع خلف الأجزاء الخارجية ،

شكل 30-23:
(أ) أنواع مختلفة من العدسات المجمعة .
(ب) أنواع مختلفة من العدسات المفرقة .



* يتحدد البعد البؤرى لعدسة ما بعدد من العوامل أكثر من حالة البعد البؤرى للمرآة ، نظرًا لأن للعدسة سطحين منحنيين ، ويعتمد مقدار الانكسار عند هذين السطحين أيضًا على معامل انكسار العدسة بالنسبة للوسط المحيط بها . ويعرف التعبير الرياضى الذى يربط كل هذه العوامل معًا **بمعادلة صانع العدسات** :

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

حيث $n = n_{lens} / n_{surr\ medium}$ ، أى النسبة بين معاملى انكسار العدسة والوسط المحيط .
أما R_1 و R_2 فهما نصفا قطرى انحناء السطح الأمامى والسطح الخلفى للعدسة على الترتيب . وتكون إشارتهما موجبة عندما يكون السطح الذى يمثلانه محدبًا ناحية الضوء وسالبة عندما يكون مقعرًا ناحية الضوء . وتعطى هذه المعادلة الإشارة الصحيحة للبعد البؤرى f بالنسبة لجميع أشكال العدسات المبينة فى الشكل 30-23 .

لأن الجزء الأوسط ينتقل مسافة أطول خلال الزجاج مما يجعل الجبهة الموجية الخارجة منحنية كما هو مبين فى الشكل 23-29 (أ) . ولما كانت الأشعة متعامدة دائمًا على الجبهات الموجية ، فإنها تتجمع نحو البؤرة F . وبالنسبة لعدسة مفرقة فإن الأجزاء الخارجية للموجة تتخلف أكثر من الجزء الأوسط مما يجعل الجبهات الموجية الخارجية ذات انحناء معكوس ، كما هو مبين فى الشكل 23-29 (ب) . ويتيح لنا هذا الملمح أن نعمم التمييز بين الأشعة التجمعة والمتفرقة إلى ما دون هذين النوعين المبينين فى الشكل 23-29 .

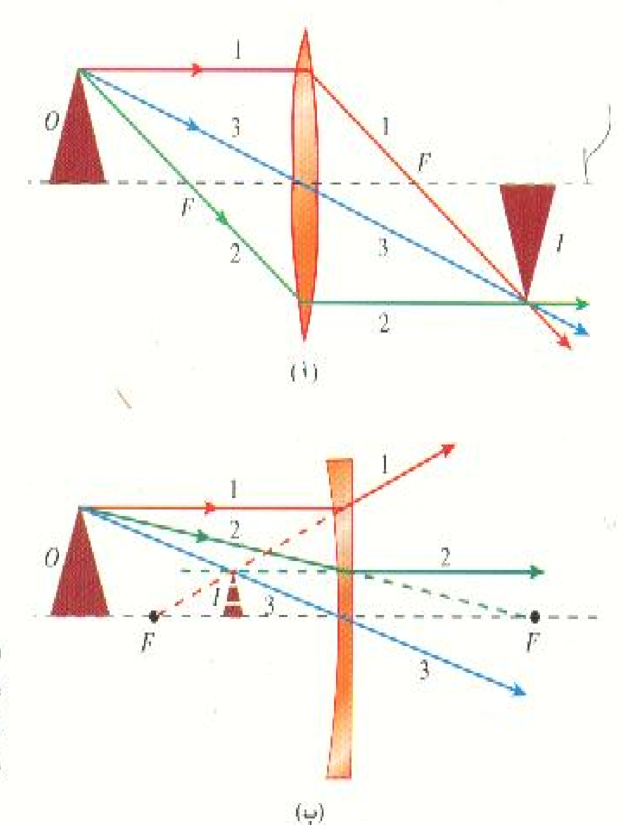
1 تتكون العدسات الكرية من أجزاء من أسطح كرتين .

2 إذا كانت العدسة أسمك عند المحور الرئيسى عنها عند الحواف فإنها تكون مجمعة ، وإذا كانت أنحف (أرفع) عند المحور الرئيسى عنها عند الحواف فهى مفرقة .

ويوضح الشكل 23-30 بعض أمثلة هذين النوعيين مقرونًا بمراكز وأنصاف أقطار تحدب أسطحها .

23-12 رسم مسار الأشعة بالنسبة للعدسات الرقيقة ؛ معادلة العدسة الرقيقة

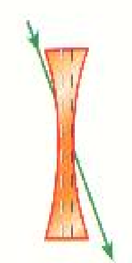
نستطيع ـ كما فعلنا فى حالة المرايا ـ أن نستخدم ثلاثة أشعة خاصة لكى نحدد موقع الصورة المتكونة بواسطة عدسة رقيقة . وقد رأينا بالفعل الشعاع رقم 1 فى الشكل 23-29 ، إذ إنه الشعاع الموازى للمحور الرئيسى . وهو ينكسر نحو البؤرة خلف العدسة بواسطة العدسة المجمعة ، وينكسر فى اتجاه مبتعد عن البؤرة أمام العدسة المفرقة . وقد ميزنا الشعاع رقم 1



شكل 23-31:
تستخدم ـ كما فى حالة المرايا ـ ثلاثة أشعة خاصة لتحديد موقع الصورة المتكونة بواسطة العدسة .

باللون الأحمر في الشكل 31-23 . أما الشعاع رقم 2 فهو الذي يمر خلال البؤرة الأمامية قبل أن يرتطم بالعدسة المجمعة أو يتجه نحو البؤرة خلف العدسة قبل أن يرتطم بالعدسة المفرقة . وفي كلتا الحالتين فإن الشعاع رقم 2 يخرج من العدسة موازيًا للمحور الرئيسي كما هو مبين بالشعاع الأخضر في الشكل 31-23 . ويمر الشعاع رقم 3 مباشرة خلال مركز العدسة بدون انحراف . ومن السهل معرفة السبب في هذا السلوك إذا رجعنا إلى الشكل 32-23 ، حيث يلاحظ أن الشعاع يدخل إلى العدسة ويغادرها عند سطحين متوازيين ، ولذلك يتصرف الشعاع كما لو كان يخترق لوحًا مسطحًا من الزجاج ؛ ولعلك تذكر من المثال 5-23 أن شعاع الضوء لا ينحرف في الاتجاه بواسطة لوح زجاجي سطحاه متوازيان . إن الشعاع يتزحزح قليلاً ويمكننا تجاهل هذا التأثير إذا تغاضينا عن سمك العدسة .

إن أي اثنين من هذه الأشعة كافيان لتحديد موقع صورة جسم ما . ويلاحظ في الشكل 31-23 (أ) أن الصورة حقيقية لأن الأشعة الثلاثة تتجمع معًا وإذا وضع حائل عند تلك النقطة لظهرت عليه الصورة . على أن الشكل 31-23 (ب) يبين صورة تقديرية لأن الأشعة المنكسرة تتفرق على نحو يبدو وكأن الأشعة قادمة من نقطة أمام العدسة ، وهذه النقطة هي موضع الصورة التقديرية وإذا وضع حائل هناك فلن تظهر عليه أية صورة .

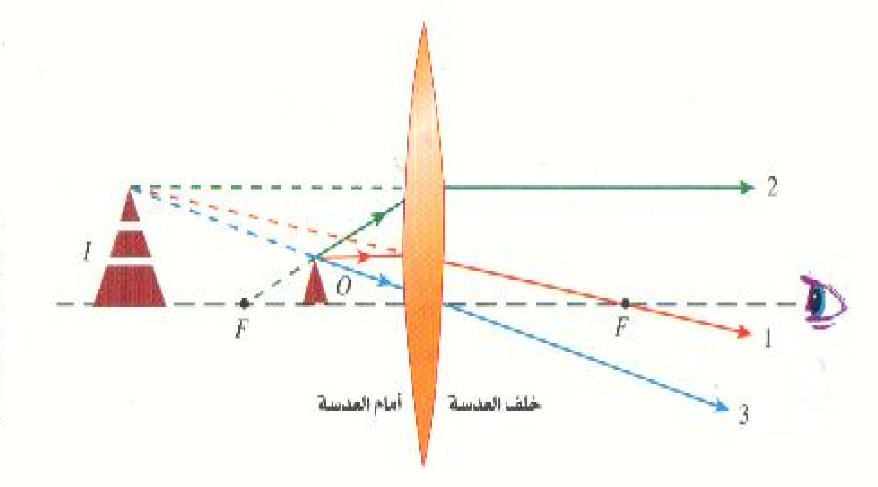


شكل 32-23:
يمر الشعاع الذي يخترق منتصف العدسة بالضرورة من خلال لوح مسطح (يحدده الخطان المتقطعان) ولهذا فإنه لا ينحرف . وتحدث زحزحة طفيفة للشعاع وإن كانت غير مبينة بالشكل . لماذا اعتبرت الزحزحة مهملة في حالة العدسة الرقيقة ؟

مثال توضيحي 3-23

تستخدم عدسة مجمعة بعدها البؤري 10.0 cm لتكوين صورة لجسم موضوع على بعد 5.0 cm أمام العدسة . ارسم مسار الأشعة لكي تحدد موقع الصورة .

استدلال منطقي : يوضح الشكل 33-23 مسار الأشعة المناظر لهذه الحالة ، ويلاحظ أن العين التي ترصد الأشعة المنكسرة خلف العدسة سوف تعتبر أن الأشعة صادرة من الموقع المبين . والصورة في هذه الحالة تقديرية ومعتدلة ومكبرة .

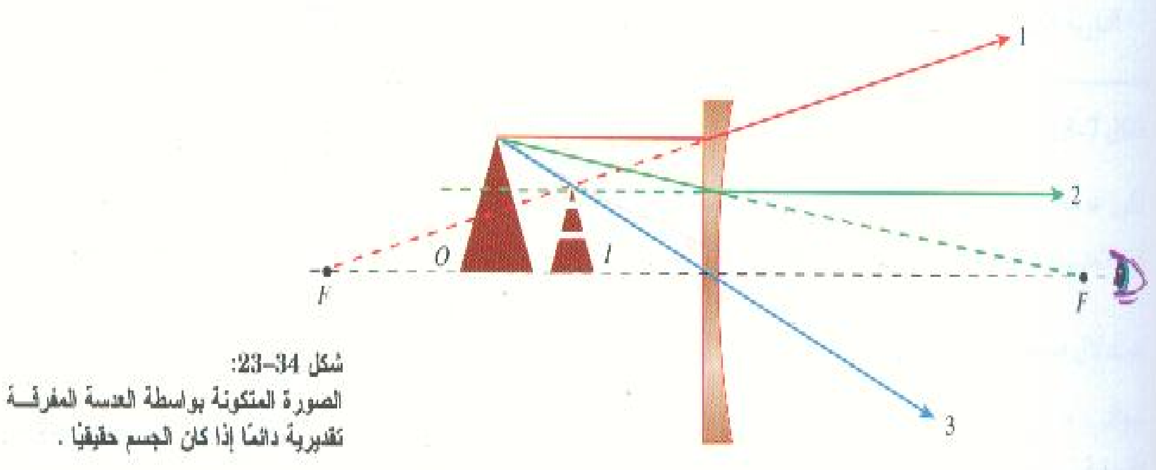


شكل 33-23:
تتكون صورة تقديرية بواسطة العدسات المجمعة (المحدبة) عندما يكون الجسم أقرب من البعد البؤري ؛ وترى العين الأشعة التي تبدو كما لو كانت قادمة من الصورة I .

مثال توضيحى 4-23

تستخدم عدسة مفرقة بعدها البؤرى 10.0 cm- لتكوين صورة جسم موضوع على بعد 5.0 cm أمام العدسة . أوجد الصورة بواسطة رسم مسار الأشعة .

استدلال منطقى : يوضح الشكل 34-23 الرسم المناظر لمسار الأشعة والصورة هنا تقديرية أيضًا . وهى معتدلة ومصغرة .

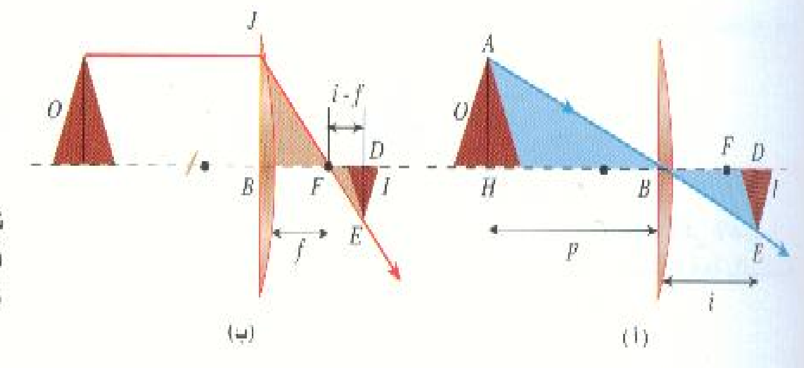


شكل 34-23:
الصورة المتكونة بواسطة العدسة المفرقة تقديرية دائمًا إذا كان الجسم حقيقيًا .

معادلة العدسة الرقيقة

يعتبر رسم مسار الأشعة ، أسلوبًا مفيدًا لتخطيط العلاقة بين الصورة والجسم . إلا أننا نود أن نطرح وسيلة تحليلية لتناول هذه العلاقة . وسنبدأ هذه العملية بدراسة الصورة المتكونة بواسطة العدسة المبينة فى الشكل 35-23 . المثلثان ABH و EBD فى الشكل (أ) متشابهان ولذا يمكننا أن نكتب الآتى :

$$\frac{I}{O} = \frac{i}{p}$$



شكل 35-23:
المثلثان ABH و EBD متشابهان وكذلك المثلثان JFB و EDF .

وقد استخدمنا نفس الرموز هنا بالنسبة لبعد الجسم وبعد الصورة مثلما فعلنا فى حالة المرايا . ومن المثلثين المتشابهين JFB و EDF فى الجزء (ب) نحصل على :

$$\frac{I}{O} = \frac{i-f}{f}$$

وبمساواة المعادلتين وإجراء بعض الاختصارات :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f} \qquad (23\text{-}2)$$

هذه العلاقة هي نفس معادلة المرايا بالضبط ولذلك أعطيناها نفس الرقم . وقد اعتبرنا p موجبًا بالنسبة لجسم أمام العدسة واعتبرنا i موجبًا بالنسبة للصورة الحقيقية المتكونة خلف العدسة .

أما بالنسبة للعدسات المفرقة فيمكننا اشتقاق العلاقة بالإشارة إلى مجموعات المثلثات المتشابهة في الشكل 36-23 . ونجد عندئذ

$$\frac{I}{O}=\frac{f-i}{f} \qquad \text{و} \qquad \frac{I}{O}=\frac{i}{p}$$

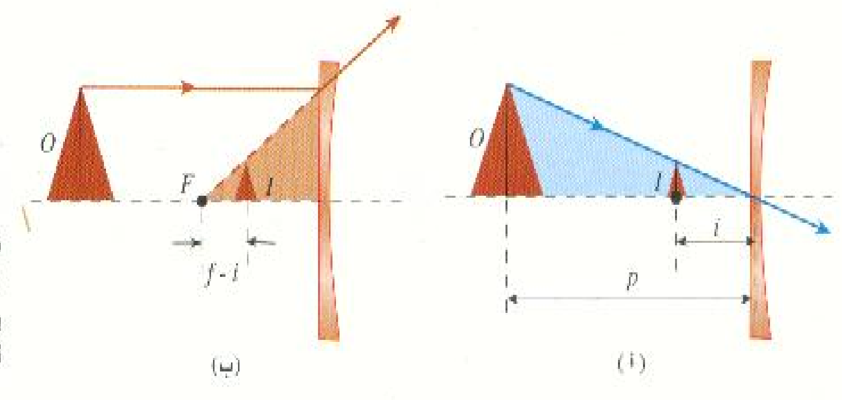
وبمساواة هاتين المعادلتين وإجراء الاختصارات نجد أن

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{i}=\frac{-1}{f}$$

ونستطيع جعل هذه المعادلة متطابقة مع المعادلة 2-23 إذا اتفقنا على قاعدة الإشارات المستخدمة لكل من f و p و i :

لكى نستخدم المعادلة 2-23 لجميع مواقف العدسات

1 بعد الجسم p موجب إذا كان الجسم أمام العدسة وسالب إذا كان خلفها (سوف نتناول القيم السالبة لبعد الجسم في القسم التالى) .
2 بعد الصورة i موجب إذا تكونت الصورة خلف العدسة (صورة حقيقية) وسالب إذا تكونت الصورة أمام العدسة (صورة تقديرية) .
3 البعد البؤرى موجب بالنسبة لعدسة مجمعة وسالب لعدسة مفرقة .



شكل 36-23:
إن أخذ المثلثات المتشابهة في الاعتبار ، يؤدى إلى معادلة العدسة الرقيقة بالنسبة للعدسات المفرقة .

ونستطيع بمساعدة قاعدة الإشارات أن نضع تعريفًا للتكبير كما فعلنا مع المرايا :

$$M=-\frac{i}{p} \qquad (23\text{-}3)\ (\text{أ})$$

ومرة أخرى : تتيح الإشارة السالبة لنا أن نحدد الصور المقلوبة على أنها ذات القيم

السالبة للتكبير M والصور المعتدلة ستكون M موجبة بالنسبة لها .

والمشاهدات العامة التالية ذات فائدة عند تناول مسائل العدسات :

1 تكون العدسات المفرقة **دائمًا** صورًا تقديرية معتدلة ومصغرة إذا كان الجسم حقيقيًا مهما كان موقع الجسم أمام العدسة .

2 تكون العدسة المجمعة صورة حقيقية مقلوبة للجسم الحقيقي إذا كان ذلك الجسم موضوعًا أبعد من النقطة البؤرية للعدسة . أما إذا كان الجسم أقرب من النقطة البؤرية فإن الصورة المتكونة تكون تقديرية ومعتدلة .

مثال 23-7

تكون عدسة مفرقة بعدها البؤرى 20 cm صورة لجسم طوله 30 cm موضوع على بعد 40 cm أمام العدسة . أوجد موضع الصورة والتكبير . وهل الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هي الإشارات الصحيحة للكميات المعطاة f و p ؟

الإجابة : الجسم موضوع أمام العدسة ولذا $p = +40\ \text{cm}$. وبما أن العدسة مفرقة فإن $f = -20\ \text{cm}$.

سؤال : ما الواجب عليَّ معرفته حتى أجد التكبير وأحدد ما إذ كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

الإجابة : التكبير هو I/O ويساوى $-i/p$. واشارة التكبير تدل على ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة .

سؤال : وهل هناك وسيلة تمكننا من توقع ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

الإجابة : بما أن لدينا جسمًا حقيقيًا وعدسة مفرقة فإن علينا أن نتوقع وجود صورة تقديرية معتدلة ومصغرة .

الحل والمناقشة : بالرجوع إلى معادلة العدسة نجد أن :

$$\frac{1}{i} = \frac{-2-1}{40\ \text{cm}} = \frac{-3}{40\ \text{cm}}$$

$$i = \frac{-40\ \text{cm}}{3} = 13.3\ \text{cm}$$

وتدلنا الإشارة السالبة على أن الصورة تقديرية أمام العدسة أما التكبير فهو :

$$M = -\frac{13.3\ \text{cm}}{+40\ \text{cm}} = \frac{+1}{3}$$

وتدل الإشارة الموجبة على أن الصورة معتدلة . ومن ثم يكون حجم الصورة هو :

$$I = \frac{1}{3}O = \frac{1}{3}(3.0\ \text{cm}) = 1.0\ \text{cm}$$

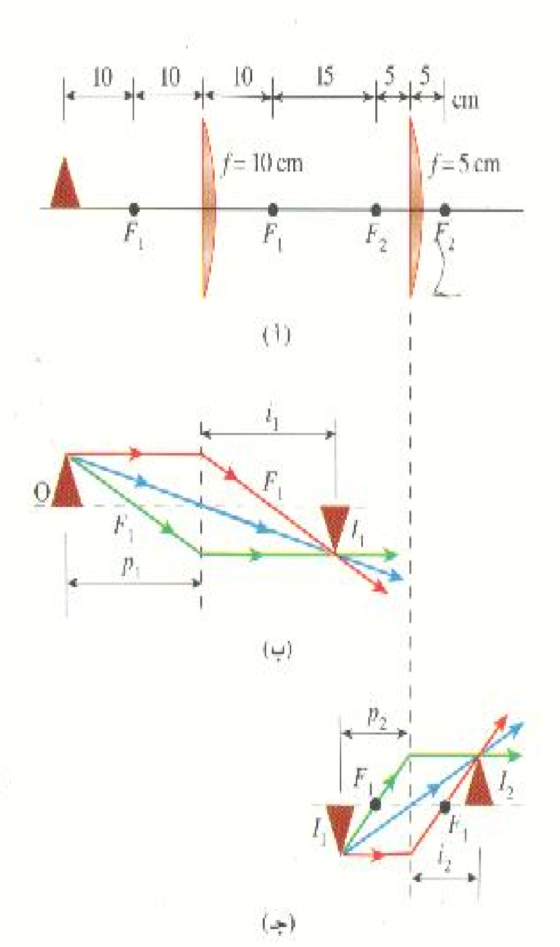
23-13 مجموعات العدسات

تحتوى معظم الأجهزة البصرية على أكثر من عدسة واحدة . ومن السهل تناول **نظم العدسات** هذه إذا تعاملنا معها بأسلوب منهجي . وسنبدأ بتحديد الصورة النهائية التى تكونها عدستان كما فى الشكل 37-23 (أ) . فالجسم يبعد 20 cm عن العدسة الأولى ، التى تبعد بدورها 30 cm عن العدسة الثانية . وكلتا العدستين مجمعة . ولنهمل العدسة الثانية تمامًا كخطوة أولى ونحاول إيجاد الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى . يحدد رسم مسار الأشعة موقع هذه الصورة وهو I_1 كما فى الشكل 37-23 (ب) . وإذا طبقنا معادلة العدسة فإنه يصبح لدينا :

$$\frac{1}{20}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{10}$$

$$i_1 = 20 \text{ cm}$$

ثم نعتبر هذه الصورة التى كونتها العدسة الأولى على أنها جسم بالنسبة للعدسة الثانية . ولكى نتأكد من أن هذا التناول صحيح ، علينا ملاحظة أن الأشعة الساقطة على العدسة الثانية هى نفس الأشعة التى قد يبعثها جسم موضوع عند I_1 . علينا الآن إهمال العدسة الأولى واستخدام I_1 كجسم بالنسبة للعدسة الثانية حتى ترسم مسار الأشعة كما فى الشكل 37-23 (جـ) . والصورة النهائية ستكون عند الموقع I_2 . وفى هذا المثال ، تكون الصورة النهائية المتكونة بواسطة العدستين حقيقية ومعتدلة .



شكل 37-23:
علينا عند إيجاد الصورة المتكونة بواسطة مجموعة من العدسات ، أن نتناول كل عدسة على حدة بمفردها .

ولكى نطبق معادلة العدسة على العدسة الثانية علينا ملاحظة أن بعد الجسم p_2 هو $+10\ \text{cm} = (30\ \text{cm} - 20\ \text{cm})$ ، وتتفق الإشارة الموجبة مع كون هذه النقطة تقع أمام العدسة الثانية ومن ثم :

$$\frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{5\ \text{cm}} - \frac{1}{10\ \text{cm}} = \frac{1}{10\ \text{cm}}$$

$$i_2 = +10\ \text{cm}$$

سنطبق الآن تعريفنا للتكبير على كل عدسة لكى نوجد الصورة النهائية وذلك بضرب قيم التكبير المنفردة فى بعضها .

$$M_{tot} = M_1M_2 = \frac{-i_1}{p_1} \times \frac{-i_2}{p_2} = \frac{-20}{20} \times \frac{-10}{10} = 1$$

ولدينا الآن النتيجة غير العادية وهى أن الصورة النهائية لها نفس حجم الجسم الأصلى وتدل الإشارة الموجبة أن الصورة النهائية معتدلة بالنسبة للجسم الأصلى : فكل عدسة قد كونت صورة مقلوبة للجسم المناظر لها .

وعندما تكون لدينا عدستان فسيكون الموقف بحيث تتكون الصورة **خلف** العدسة الثانية . افترض ، مثلاً ، أن العدستين اللتين استخدمناهما قد وضعتا وبينهما مسافة 15 cm بدلاً من 30 cm . إن الأشعة الخارجة من العدسة الأولى ستظل **متجمعة** عندما تصل إلى العدسة الثانية . ومن الواضح أن هذا ليس هو سلوك الأشعة الصادرة من جسم حقيقى والتى دائمًا **ما تتفرق** . على أننا لسنا مضطرين للبحث عن معادلة جديدة . فكما فعلنا فى القسم السابق ، يمكننا تناول هذه الحالة بأن نعامل الجسم المناظر للعدسة الثانية على أنه **جسم تقديرى** وجعل إشارة المسافة p_2 بينه وبين العدسة الثانية سالبة .
كل الحالات الممكنة للعدسات يمكن تناولها بواسطة المعادلة 2-23 لو أننا راعينا الإشارات المتفق عليها فى القسم 12-23 بعناية .

مثال 8-23

أوجد موقع وحجم واتجاه (ما إذا كانت معتدلة أم مقلوبة) الصورة المتكونة بواسطة العدستين المذكورتين فى المناقشة السابقة إذا كانت المسافة بينهما 15 cm .

استدلال منطقى :

I

سؤال : هل تغير أى شيء يتعلق بالصورة الأولى عند المناقشة السابقة ؟

الإجابة : لا . لقد تجاهلنا تمامًا العدسة الثانية عند معالجة العدسة الأولى ولهذا لن تتأثر الصورة الأولى بموضع العدسة الثانية .

سؤال : ما هو بعد الجسم بالنسبة للعدسة الثانية ؟

الإجابة : بما أن I_1 تتكون الآن على مسافة 5 cm **خلف** العدسة الثانية ، فإن عليك

وضع $p_2 = -5\ \text{cm}$ لبعد هذا الجسم التقديرى . ومن ثم تكون معادلة العدسة بالنسبة للعدسة الثانية هى : $1/i_2 = 1/(5\ \text{cm}) - 1/(-5\ \text{cm})$. تأكد من إنك قد لاحظت مدى العناية التى يجب مراعاتها مع الإشارات .

الحل والمناقشة : إن بعد الصورة الثانية هو

$$\frac{1}{i_2} = \frac{2}{5\ \text{cm}} \qquad \text{أو} \qquad i_2 = 2.5\ \text{cm}$$

ويصبح التكبير هو :

$$M_{tot} = \frac{-20\ \text{cm}}{20\ \text{cm}} \times \frac{-2.5\ \text{cm}}{-5.0\ \text{cm}} = -0.5$$

أى أن الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغرة .

تمرين : أعد المثال السابق مع وضع عدسة مفرقة على أنها العدسة الثانية بحيث كان بعدها البؤرى 10 cm . **الإجابة :** $i_2 = +10\ \text{cm}$ ؛ $M_{tot} = -2$ ؛ **والصورة حقيقية ومقلوبة ومكبرة .**

العدسات فى مجموعات متلاصقة

قد تكون ممن فحصوا نظرهم ولاحظت أن الطبيب يضع أحيانًا أكثر من عدسة معًا أمام عينك . ولكى يصل الطبيب إلى أفضل مجموعة من العدسات فلابد له من وسيلة يجمع بها تأثير العدسات الرقيقة المتلاصقة . ومن السهل اشتقاق الصيغة الضرورية البسيطة ، كما سنرى الآن . وسنتناول الحالة التى تكون فيها الأبعاد البؤرية للعدسات أكبر بكثير من المسافات التى تفصل بين العدسات .

ويعطى موقع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى من المعادلة :

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1}$$

سنفحص الآن الحالة التى تكون فيها العدسة رقم 1 مجمعة وتكوّن صورة حقيقية وبما أن هذه الصورة ستقع خلف العدسة رقم 1 فلابد أن تكون أيضًا خلف العدسة رقم 2 لأننا سنعتبر العدستين عند نفس الموقع عمليًا ، وهذا هو ما عنيناه بقولنا أن المسافة بين العدسات مهملة إلى جانب أبعادها البؤرية . وهكذا تكوّن الصورة الأولى جسمًا تقديريًا للعدسة 2 ولذا فإن $p_2 = -i_1$ طبقًا لقاعدة الإشارات وتعطينا معادلة العدسة 2 ما يلى :

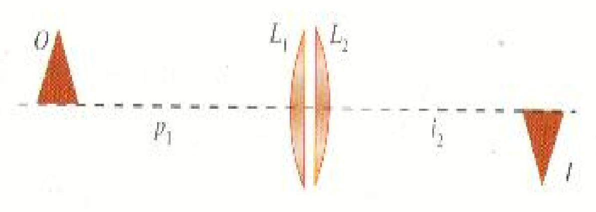
$$\frac{1}{-i_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2}$$

وبجمع معادلتى العدستين معًا فإن i_1 تختفى :

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

وكما يتضح من الشكل 23-38 ، فإن p_1 هو موقع الجسم الأصلى و i_2 هو موقع الصورة

النهائية . أى أن هذه المعادلة هى نفس معادلة العدسة بالنسبة **لعدسة منفردة** بعدها البؤرى f يعطى بالعلاقة :



شكل 38–23:
عندما تكون العدستان متلاصقتين معًا فإن تأثيرهما المزدوج هو أنهما تعملان كعدسة منفردة بعدها البؤرى هو :
$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2} \qquad (23\text{-}8)$$

ويمكن مد استعمال المعادلة (8–23) لتشمل أكثر من عدستين وكلها متلاصقة طالما كان سمك المجموعة مهملاً إذا قورن بالأبعاد البؤرية المنفردة. كما أن هذه المعادلة تنطبق أيضًا على أية مجموعة من العدسات المجمعة والمفرقة طالما استعملت الإشارات الصحيحة للأبعاد البؤرية .

مثال توضيحى 5–23

وضعت ثلاث عدسات متلاصقة مع بعضها البعض . وكانت أبعادها البؤرية على الترتيب هى 20 ، 30– ، 60 cm . ما هو البعد البؤرى للمجموعة ؟ وهل المجموعة تكافئ عدسة مجمعة أم مفرقة ؟

استدلال منطقى : يعطى البعد البؤرى الفعال للمجموعة بالمعادلة 8–23 :

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}+\frac{1}{f_3}=\frac{1}{20\text{ cm}}+\frac{1}{-30\text{ cm}}+\frac{1}{60\text{ cm}}=\frac{3-2+1}{60\text{ cm}}=\frac{2}{60\text{ cm}}$$

$$f=30\text{ cm}$$

وبما أن f موجب فالمجموعة مجمعة .

تدريب : إذا كان البعد البؤرى للعدسة الثالثة فى المثال التوضيحى السابق هو $f = -60$ cm بدلاً من 60+ cm ، فإثبت أن العدسات الثلاث ستعمل معًا كلوح مسطح من الزجاج .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) قوانين الانعكاس والانكسار ، (ب) الجبهة الموجية ، (جـ) الشعاع ، (د) الموجة المستوية ، (هـ) الصورة الحقيقية والتقديرية ، (و) الجسم الحقيقى والتقديرى ، (ز) النقطة البؤرية (البؤرة) والبعد البؤرى ، (ح) معامل الانكسار ، (ط) الانعكاس الداخلى الكلى ، (ى) الزاوية الحرجة ، (ك) بعد الجسم ، (ل) بعد الصورة ، (م) نصف قطر الانحناء ، (ن) المرايا والعدسات المجمعة (اللامة) والمفرقة ، (س) التكبير .

2 أن تذكر الحدود التقريبية للأطوال الموجية للضوء المرئى وأن تذكر الألوان التقريبية المصاحبة لطول موجى معين .

3 أن تستطيع حساب معامل انكسار وسط ما إذا عرفت سرعة الضوء فيه والعكس بالعكس .

4 أن ترسم الأشعة المناظرة لمجموعة معينة من الجبهات الموجية والعكس بالعكس . وأن تشرح السبب فى أن المصدر البعيد تنتج عنه أشعة متوازية .

5 أن ترسم الشعاع المنعكس عندما يكون الشعاع الساقط على سطح أملس معلومًا .

6 أن تستخدم قانون سنل فى حالات بسيطة .

7 أن تشرح السبب فى أن الانعكاس الداخلى الكلى لا يحدث إلا عندما يكون $n_2 > n_1$. وأن تحسب الزاوية الحرجة للانعكاس الداخلى الكلى فى حالة حد فاصل بين وسطين لهما معاملا انكسار معلومان .

8 أن تستخدم رسم مسارات الأشعة بالنسبة لمرايا كرية منفردة وعدسات رقيقة . وأن تذكر خصائص الصورة فى أية حالة معينة .

9 أن تستخدم معادلة صانع العدسات فى حساب البعد البؤرى لعدسة رقيقة إذا عرفت أنصاف أقطار انحناء أسطح للعدسات والمادة التى صنعت منها .

10 أن تستخدم معادلة العدسات أو المرايا لإيجاد p و i أو f إذا علم اثنان من الثلاثة . وأن تربط بين f ونصف قطر انحناء مرآة كرية . أن تفسر معنى إشارات كل من p و i و f فى أية حالة معينة .

11 أن تعين تكبير واتجاه صورة ما إذا عرفت قيم p و i .

12 أن تذكر ما إذا كانت العدسة مفرقة أو مجمعة من مجرد رؤية شكلها وهى فى الهواء .

13 أن تشرح كيفية تعيين البعد البؤرى لمرآة مقعرة وعدسة مجمعة بتجربة عملية .

14 أن تحسب البعد البؤرى الفعال لعدد من العدسات الرقيقة المتلاصقة معًا عندما تكون الأبعاد البؤرية المنفردة لها معلومة .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

قانون الانعكاس

زاوية السقوط = زاوية الانعكاس $\theta_i = \theta_r$

أنواع الأجسام والصور

الجسم الحقيقى : هو الجسم الموضوع أمام العدسة أو المرآة . والأشعة الساقطة من جسم حقيقى تشكل نمطًا متفرقًا .

الصورة الحقيقية : هى الصورة المتكونة خلف عدسة أو أمام مرآة . وتتجمع الأشعة المكونة لصورة حقيقية فعليًا خلال نقطة .

الصورة التقديرية : هى الصورة الواقعة أمام عدسة أو خلف مرآة . وتتفرق الأشعة المكونة لصورة تقديرية من نقطة الصورة .

الجسم التقديرى : هو الجسم الواقع خلف عدسة أو مرآة . وتشكل أشعة الجسم التقديرى نمطًا متجمعًا من الأشعة الساقطة على العدسة أو المرآة . ويتطلب هذا أن تكون هذه الأشعة صادرة من عدسة أو مرآة سابقة .

الأشعة الرئيسية للمرايا المقعرة

للمرآة المقعرة بؤرة أمام المرآة على مسافة مقدارها $f = R/2$ من المرآة . والأشعة الرئيسية اللازمة لتحديد موضع الصورة هى :

1 شعاع ساقط مواز للمحور الرئيسى وينعكس عبر النقطة البؤرية (البؤرة) .

2 شعاع ساقط على طول خط يخترق النقطة البؤرية ، ويوازى المحور الرئيسى عند انعكاسه .

3 شعاع ساقط على طول خط يمر خلال مركز الانحناء وينعكس مرتدًا على نفسه .

الأشعة الرئيسية للمرايا المحدبة

للمرآة المحدبة بؤرة خلف المرآة وعلى مسافة مقدارها $f = R/2$ من قمة المرآة . والأشعة الرئيسية اللازمة لتحديد موقع الصورة هي :

1 شعاع ساقط موازٍ للمحور الرئيسي وينعكس على طول خط يتجه بعيدًا عن البؤرة .

2 شعاع ساقط على طول خط يتجه نحو البؤرة وينعكس موازيًا للمحور الرئيسي .

3 شعاع ساقط على طول خط يتجه نحو مركز الانحناء وينعكس مرتدًا على طول نفس الخط .

معادلة المرآة

يرتبط البعد البؤرى f وبعد الجسم p وبعد الصورة i بمعادلة المرآة :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

وتستخدم قاعدة الإشارات التالية :

f : موجب للمقعرة وسالب للمحدبة .

p : موجب للجسم الحقيقى وسالب للجسم التقديرى .

i : موجب للصورة الحقيقية وسالب للصورة التقديرية .

التكبير (M)

$$M = \frac{I}{O}$$

حيث I و O هى الأبعاد الخطية للصورة والجسم على الترتيب . ويمكن التعبير عنه أيضًا بدلالة موضعى الجسم والصورة ،

$$M = \frac{-i}{p}$$

وهذا يعطى قيمة موجبة للتكبير M للصورة المعتدلة وقيمة سالبة للصورة المقلوبة .

معامل الانكسار (n)

$$\frac{c}{v} = \frac{\text{سرعة الضوء فى الفراغ}}{\text{سرعة الضوء فى المادة}} = n$$

ويتباطأ الضوء عند الانتقال عبر المواد الشفافة بحيث $n > 1$ لجميع المواد .

قانون الانكسار (قانون سنل)

يرتبط الشعاع الساقط والشعاع المنكسر عند الحد الفاصل بين مادتين لهما معاملا انكسار n_1 و n_2 بالعلاقة :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

وتقاس هذه الزوايا بالنسبة للعمود المقام على الحد الفاصل عند نقطة السقوط .

الانعكاس الداخلى الكلى

عندما يمر الضوء من مادة معامل انكسارها n_1 أكبر إلى وسط معامل انكساره n_2 أقل فإن الانكسار يكون مستحيلاً إذا زادت زاوية السقوط عن قيمة حرجة معينة θ_c . وعندئذ ينعكس الشعاع الساقط بنسبة مائة بالمائة مرتدًا إلى المادة التى سقط منها . وهذا ما يسمى الانعكاس الداخلى الكلى ، وتعطى θ_c بالعلاقة :

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

العدسات الكرية الرقيقة ومعادلة العدسة الرقيقة

العدسة الرقيقة هي التي يكون بعدها البؤري أكبر بكثير من سمك العدسة . وسطحا العدسة كرويان . ولها نقطتان بؤريتان (بؤرتان) تقعان متماثلتين على جانبي العدسة .

والعدسة **المجمعة** هي التي تكون عند منتصفها أسمك منها عند الحواف أما العدسة **المفرقة** فتكون أسمك عند الأطراف عنها عند المنتصف .

ومعادلة العدسة الرقيقة هي

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{i}$$

وتستخدم قاعدة الإشارات بالنسبة لكل من p و i مثلما حدث بالنسبة للمرايا . وتتلخص إشارات البعد البؤري فيما يلي : f موجب للعدسات المجمعة ، f سالب لعدسات المفرقة .

معادلة صانع العدسات

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

حيث n هو معامل انكسار مادة العدسة بالنسبة للمادة المحيطة بالعدسة . R_1 هو نصف قطر انحناء السطح الأمامي ، أما R_2 فهو نصف قطر انحناء السطح الخلفي . R_1 و R_2 موجبان إذا كان السطحان محدبين نحو الضوء الساقط ، وسالبان إذا كانا مقعرين .

الأشعة الرئيسية للعدسات الرقيقة

العدسات المجمعة :

1. شعاع يسقط موازيًا للمحور الرئيسي ثم ينكسر خلال النقطة البؤرية البعيدة .
2. شعاع يسقط خلال النقطة البؤرية القريبة ثم ينكسر موازيًا للمحور الرئيسي .
3. شعاع يسقط عند منتصف العدسة فيمر مباشرة عبرها .

العدسات المفرقة :

1. شعاع يسقط موازيًا للمحور الرئيسي ثم ينكسر على طول خط يمتد من النقطة البؤرية القريبة .
2. شعاع يسقط على طول خط يخترق النقطة البؤرية البعيدة ثم ينكسر موازيًا للمحور الرئيسي .
3. شعاع يسقط عند منتصف العدسة فيمر مباشرة عبرها .

مجموعات العدسات المتعددة

تنطبق معادلة العدسة على كل عدسة في المجموعة وتعمل الصورة التي تكونها العدسة الأولى كجسم للعدسة الثانية وهكذا . والتكبير الكلي للعدسات المتعددة هو حاصل ضرب قيم تكبير كل عدسة .

العدسات المتلاصقة

إذا أهملت المسافة بين عدستين بالمقارنة مع بعديهما البؤريين f_1 و f_2 فإن العدستين تعملان كعدسة واحدة ويكون البعد البؤري الفعال لهما هو .

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$$

أسئلة وتخمينات

1 لدينا مرآة مقعرة وجسم موجود فى اللانهاية . أين تتكون الصورة ؟ وهل هى معتدلة أم مقلوبة ؟ وهل هى أكبر أم أصغر من الجسم ؟ أجب عن هذه الأسئلة عندما يقترب الجسم ببطء نحو المرآة . وسجل المواضع التى يكون عندها الجسم عند تغير أى من الإجابات .

2 أعد السؤال 1 بالنسبة لمرآة محدبة .

3 أعد السؤال 1 بالنسبة لعدسة مجمعة .

4 أعد السؤال 1 بالنسبة لعدسة مفرقة .

5 عندما تنظر فى بحيرة صافية أو وعاء كبير ممتلئ بالماء ، فلماذا يبدو الماء دائمًا أضحل (أقل عمقًا) عما هو فى الحقيقة ؟

6 استعن برسم الجبهة الموجية لتشرح السبب فى أن العدسة قد تكون مجمعة أو مفرقة اعتمادًا على المادة المحيطة بالعدسة .

7 هل يمكن لكوب ماء فارغ أن يجمع حزمة ضوئية فى بؤرة ؟ وهل يمكن ذلك إذا كان الكوب مملوءًا ؟ وهل من الممكن أن تشتعل النيران مصادفة إذا وضع وعاء زجاجى ملىء بالماء على جدار نافذة تسطع عليه الشمس ؟

8 كيف يمكنك استخدام معادلة المرآة لإيجاد موضع صورة جسم فى مرآة مستوية ؟

9 عندما يمر الضوء من الهواء إلى الزجاج فما الذى يتغير من المقادير الآتية : f أم λ أم v ؟

10 لماذا تستطيع سمكة ذكية فى بحيرة هادئة أن تراك وأنت على ضفة البحيرة ، إذا نظرت إلى أعلى بزاوية مقدارها نحو $50°$ مع الخط الرأسى ؟

11 كيف تعمل المرايا ذات الاتجاه الواحد ؟

12 يمكن بناء « فرن شمسى » باستعمال مرآة مقعرة تقوم بتجميع أشعة الشمس فى بؤرة على منطقة صغيرة وهى منطقة الفرن . كيف لك أن تتوقع تغير درجة حرارة الفرن عند تغيير مساحة المرآة والبعد البؤرى .

13 تؤدى فقاعة هوائية كروية داخل قطعة من الزجاج عمل عدسة صغيرة . اشرح هذا . وهل هى عدسة مجمعة أم مفرقة ؟

14 كيف يمكن لنا تعيين البعد البؤرى لعدسة مجمعة ؟ ولعدسة مفرقة ؟ ولمرآة محدبة ؟

15 وضعت مرآتان مستويتان بحيث كونتا زاوية قائمة ، ثم وضع جسم بينهما . فكم عدد الصور المتكونة ؟ كرر السؤال لو كانت الزاوية بين المرآتين $30°$.

16 ما هى الزيادة فى طول الفترة الزمنية بالتقريب التى تستغرقها نبضة ضوئية تنتقل من القمر إلى الأرض بسبب وجود هواء فى جو الأرض بدلًا من الفراغ ؟

17 اعتقد نيوتن أن الضوء مكون من جسيمات ، وأن « جسيمات الضوء » هذه تجذب بشدة بواسطة سطح الماء عندما ينتقل الضوء من الهواء إلى الماء . كيف يؤدى هذا إلى الأثر الذى نلاحظه للانكسار ؟

18 تخصص عادة غرفة خاصة فى العديد من متاحف العلوم (وكذلك فى بعض الأماكن غير المتوقعة) بحيث يمكن لشخص أن يهمس فى إحدى النقط الخاصة بها فيسمع بوضوح فى نقطة معينة بعيدة . فكيف يجب أن تشيد هذه الغرفة حتى يتم إنجاز هذا التأثير ؟

مسائل

الأقسام من 1-23 إلى 4-23

1 ينعكس شعاع ليزر صادر من الأرض إلى الأرض مرة أخرى بواسطة مرآة مثبتة على مكوك فضائي يبعد عن الأرض بنحو 4.2×10^6 m . ما الزمن الذى يستغرقه الشعاع فى رحلته ذهابًا وإيابًا ؟

2 ينعكس شعاع رادار من سحب مطيرة تبعد 30 km عن محطة الإرسال . ما الزمن الذى تستغرقه موجات الرادار لتقطع المسافة جيئة وذهابًا ؟

3 لكثير من آلات التصوير علامات تدل على التركيز فى بؤرة وتدل هذه العلامات على المسافة بين الجسم وآلة التصوير . افترض أنك تريد أن تلتقط صورة لنفسك فى مرآة مستوية . فإذا كنت أنت وآلة التصوير على بعد 50 cm من المرآة . فما هى القيمة التى تضبط عليها مقياس المسافات فى آلة التصوير لديك ؟

4 ينوى أحد مصممى الديكورات الداخلية تثبيت مرآة حائطية مستوية بحيث يستطيع شخص طوله 1.8 m أن يرى طوله كاملاً فى المرآة . ما هو أقصر طول للمرآة في هذه الحالة ، وما هو ارتفاع الحد السفلى للمرآة فوق سطح الأرض الذى يضمن هذا ؟

5 إذا كنت تتحرك نحو مرآة مستوية بسرعة مقدارها 1.2 m/s . فما هى السرعة التى تقترب بها من صورتك فى المرآة ؟

6 ينعكس شعاع ضوئى مرتدًا على نفسه من مرآة عمودية على الشعاع . ثم أديرت المرآة بحيث صنع العمود المقام على سطحها زاوية مقدارها $24°$ مع الشعاع . ما هى الزاوية الجديدة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ؟

7 ينعكس شعاع ضوئى من مرآة مستوية بحيث كانت الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس $64°$. (أ) إذا أديرت لكى تزيد زاوية السقوط بمقدار $3°$ فكم تصبح الزاوية الجديدة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ؟ (ب) وإذا حركت المرآة لخفض زاوية السقوط بمقدار $2°$ فكم تصبح الزاوية الجديدة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ؟

8 وضع جسم بين مرآتين مستويتين متوازيتين فتكون له عدد لا نهائى من الصور . فإذا كانت المسافة بين المرآتين 50 cm والجسم موضوع فى منتصف المسافة بينهما ، فما هو بعد الصور الخمسة الأولى عن الجسم ؟

■ 9 يقف شخص ما في غرفة بها مرآتان مستويتان ومتوازيتان مثبتتان على جدارين متقابلين . فإذا كان الشخص يبعد 6 ft عن إحدى المرآتين و 12 ft عن المرآة الأخرى ، فما هى المسافة بين هذا الشخص والصور الثلاث الأولى التى تظهر فى المرآة الأولى ؟

10 وضعت مرآتان فوق منضدة وكانتا مستويتين وبينهما زاوية قائمة بحيث كانت هناك زاوية مقدارها $90°$ بين السطحين العاكسين . وانعكس شعاع موازٍ لسطح المنضدة بواسطة إحدى المرايا ثم بواسطة الأخرى . إثبت أن اتجاه الشعاع النهائى المنعكس هو عكس اتجاه الشعاع الأصلى الساقط تمامًا .

■ 11 أعيد ترتيب المرآتين فى المسألة رقم 10 بحيث صارت الزاوية المحصورة بينهما هى θ . ثم أسقط شعاع موازٍ لسطح المنضدة على إحدى المرايا بزاوية معينة ثم توالت انعكاساته من المرايا . اثبت أن الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع الخارج هو 2θ .

الأقسام من 5-23 إلى 7-23

12 كونت مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 30 cm صورة لجسم ارتفاعه 2.0 cm ويقع على بعد 45 cm أمام المرآة . (أ) أوجد موضع وحجم الصورة . وهل هى حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟ أعد المسألة عند أبعاد للجسم مقدارها (ب) 30 cm ؛ (جـ) 20 cm ؛ (د) 10 cm . اختبر صحة الإجابات برسم مسار الأشعة .

13 وضع جسم طوله 10 cm على بعد 36 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 20 cm . أوجد موضع وحجم الصورة واذكر ما إذا كانت حقيقية أم تقديرية ، ومعتدلة أم مقلوبة . تحقق من إجاباتك برسم مسار الأشعة .

14 أعد المسألة رقم 13 بالنسبة لأبعاد الجسم التالية (أ) 20 cm ، (ب) 16 cm ، (جـ) 6 cm .

15 وضعت عملة معدنية قطرها 2.0 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 30 cm . أوجد موقع وحجم صورة العملة . هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟

16 تكونت صورة تقديرية على بعد 15 cm من مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 30 cm . أوجد موقع الجسم .

17 يستخدم أحد أطباء الأسنان مرآة مقعرة بعدها البؤرى 25 mm . ما هو التكبير الذى تحدثه عندما تثبت على بعد 16 mm من ضرس ما .

18 استخدمت مرآة مقعرة بعدها البؤرى 120 cm لتكوين صورة حقيقية لجسم ما . (أ) أين يجب وضع الجسم إذا كان بعد الجسم مساوٍ لبعد الصورة ؟ (ب) هل الجسم والصورة متراكبان ؟ (جـ) ما مقدار التكبير ؟

19 أين يجب وضع جسم ما أمام مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 1.00 m . إذا أريد للصورة أن تكون حقيقية وحجمها ضعف حجم الجسم ؟

20 أين يجب وضع الجسم فى المسألة السابقة إذا أريد للصورة أن تكون تقديرية وحجمها ضعف حجم الجسم ؟

▪ 21 أين يجب وضع جسم ما إذا كانت الصورة التى تكونها مرآة مقعرة تبعد عن المرآة بمسافة تبلغ ثلث (1/3) بعد الجسم عن المرآة ؟ هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟

▪ 22 تتكون لجسم ارتفاعه 2 cm صورة تقديرية ارتفاعها 5 cm عندما يوضع على بعد 3 cm من مرآة مقعرة . ما هو البعد البؤرى للمرآة ؟

▪ 23 لديك مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 60 cm . عين موضع جسم ستكون صورته مقلوبة وحجمها ثلاثة أمثال حجم الجسم .

▪ 24 أوجد بعد الجسم فى المسألة رقم 23 إذا كانت صورته معتدلة وحجمها ثلاثة أمثال حجم الجسم .

القسم 8-23

25 (أ) أوجد موضع وحجم وطبيعة (أى حقيقية أم تقديرية ، معتدلة أم مقلوبة) الصورة المتكونة عندما يوضع جسم ارتفاعه 3 cm على بعد مقداره 50 cm من مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 25 cm . أعد المسألة لأبعاد الجسم التالية : (ب) 20 و (جـ) 10 cm . تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة .

26 ما هو موضع صورة جسم موضوع على بعد 48 cm أمام مرآة محدبة بعدها البؤرى 24 cm ؟ ما هو مقدار التكبير ؟ هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

▪ 27 تكونت صورة تقديرية بواسطة مرآة محدبة بعدها البؤرى 40 cm . (أ) أين يجب وضع جسم ما إذا أريد أن تكون الصورة أصغر مرتين من الجسم ؟ (ب) هل من الممكن أن نحصل على صورة تقديرية أكبر من الجسم باستخدام هذا النوع من المرايا .

▪ 28 تكونت صورة تقديرية حجمها ثلث حجم جسم ما بواسطة مرآة محدبة بعدها البؤرى 40 cm . أوجد موقع الجسم وموقع الصورة .

29 تلزم مرآة محدبة بعدها البؤرى 20 cm لتكوين صورة تبعد 12 cm عن المرآة . فكم يجب أن يكون بعد الجسم ؟ وما هو التكبير ؟

▪ 30 ما هو بعد الجسم إذا كانت الصورة المتكونة بواسطة مرآة محدبة تبعد عن المرآة مسافة تبلغ نصف بعد الجسم ؟ ما مقدار التكبير ؟

▪ 31 تستخدم مرآة محدبة ذات زاوية واسعة ونصف قطر انحنائها 0.50 cm فى محل للبقالة لمراقبة الممرات . أوجد موضع صورة أحد العملاء الواقفين فى أحد الممرات على بعد 8.0 m من المرآة . وطبيعة تلك الصورة . ما هو التكبير ؟

32 يبلغ قطر إحدى كرات الزينة فى شجرة عيد الميلاد 8.0 cm . (أ) ما هو موضع صورة طفل يقف على بعد 80 cm من الكرة اللامعة ؟ (ب) ما هو تكبير الصورة ؟

القسم 9-23

33 الطول الموجى للضوء الأصفر المنبعث من مصباح صوديوم قوسى 589 nm . وعندما يعبر شعاع من هذا الضوء خلال الإيثانول فكم تبلغ . (أ) سرعته ، (ب) طوله الموجى ، و (جـ) تردده ؟

34 الطول الموجى للضوء الأزرق المنبعث من الزئبق هو 436 nm . وعندما يخترق شعاع من هذا الضوء الماء فكم تكون (أ) سرعته ، (ب) طوله الموجى ، (جـ) تردده .

35 يخترق شعاع من الضوء الأحمر المنبعث من ليزر هليوم ـ نيون ($\lambda = 633$ nm) لوحًا من الزجاج ($n = 1.56$) بزاوية مقدارها 30° مع العمود . (أ) ما هى سرعة الشعاع داخل الزجاج ؟ (ب) وما هو طوله الموجى ؟ (جـ) وما هى الزاوية التى يصنعها مع العمود داخل الزجاج ؟

36 يدخل إلى الماء شعاع من الضوء الأخضر طوله الموجى $\lambda = 546$ nm بزاوية مقدارها 60° مع العمود المقام على سطح الماء . (أ) ما هو الطول الموجى لهذا الضوء داخل الماء ؟ (ب) ما مقدار الزاوية التى يصنعها الشعاع المار داخل الماء مع العمود ؟

37 يدخل ضوء لوحًا زجاجيًا مسطحًا ($n = 1.56$) بزاوية مقدارها 48° مع العمود المقام على السطح العلوى . (أ) ما هى زاوية الانكسار داخل اللوح الزجاجى ؟ (ب) وبعدما يخرج الشعاع من السطح السفلى للوح ، ما هى الزاوية المحصورة بينه وبين الشعاع الأصلى الساقط على اللوح ؟

38 ما هى المسافة التى يقطعها شعاع من الضوء داخل الماء ($n = 1.33$) إذا كان يقطع فى نفس الفترة الزمنية 1 m فى الزجاج ($n = 1.56$) ؟

39 يتغير معامل انكسار الزجاج تغيرًا طفيفًا عند تغير الطول الموجى للضوء ، حيث يبلغ معامل انكسار زجاج فلنت 1.650 للضوء الأزرق ($\lambda = 430$ nm) و 1.615 للضوء الأحمر ($\lambda = 680$ nm) . سقط شعاع مكون من هذين اللونين على لوح من زجاج فلنت بزاوية سقوط مقدارها 45° . أوجد الزاوية المحصورة بين الشعاعين الملونين داخل الزجاج .

40 ما مقدار الزاوية التى يسقط بها شعاع من الضوء على سطح مستو للوح زجاجى ($n = 1.56$) إذا كان الشعاع المنكسر متعامدًا مع الشعاع المنعكس ؟

41 لاحظ أحد السابحين فى حمام للسباحة أن شعاعًا من ضوء الشمس يعمل داخل الماء زاوية مقدارها 27° مع الخط الرأسى . ما هى زاوية سقوط الشعاع فى الهواء على سطح الماء . اعتبر سطح الماء مستويًا وأفقيًا .

42 يسقط شعاع ضوئى بزاوية مقدارها 24° على سطح سائل ما . فإذا كان الضوء ينتقل خلال ذلك السائل بسرعة مقدارها 2.3×10^8 m/s . فما هى زاوية انكسار الشعاع داخل السائل ؟

43 ينفذ شعاع ضوئى من الماء إلى مادة شفافة بزاوية 36° مع العمود . ويصنع الشعاع المنكسر داخل المادة الشفافة زاوية مقدارها 24° . ما هى سرعة الضوء داخل المادة الشفافة ؟ اعتبر سطح الاتصال بين الماء والمادة الشفافة مستويًا ومسطحًا .

■ 44 يبعد غواص يستخدم جهاز تنفس تحت الماء مسافة أفقية مقدارها 280 m بعيدًا عن الشاطئ وعلى عمق 90 m تحت سطح الماء . ويطلق الغواص شعاع ليزر نحو سطح الماء بحيث يرتطم الشعاع بسطح الماء عند نقطة تبعد 190 m عن الشاطئ . ثم يصل الشعاع بعد انكساره إلى قمة مبنى قائم على حافة الماء على الشاطئ . ما هو ارتفاع المبنى ؟

■ 45 وضعت قطعة نقود معدنية فى قاع حمام سباحة . وعندما ينظر إليها شخص ما من فوقها مباشرة فإن عمقها تحت السطح يبدو 2.4 m . ما هو العمق الحقيقى للحمام ؟

القسم 10-23

46 ينبعث شعاع ضوئى من مصدر يقع على عمق 4 m تحت سطح بركة ماء ساكنة ، إلى أعلى نحو السطح . ما هى أقصى زاوية يمكن أن يصنعها الشعاع فى الماء مع الخط الرأسى إذا كان جزء من الحزمة الضوئية قادرًا على النفاذ إلى الهواء ؟

47 ما هي الزاوية الحرجة للضوء داخل قطعة من الألماس معامل انكسارها 2.42 عندما . (أ) يحاط الألماس بالهواء و (ب) يغمس الألماس في الماء ؟

48 الزاوية الحرجة لمعدن ما محاط بالهواء هي $41°$. ما هي سرعة الضوء في المعدن ؟

49 يسقط شعاع ضوئي من الهواء إلى سطح سائل ما . وكانت زاوية السقوط $36°$ وزاوية الانكسار داخل السائل $25°$ أوجد الزاوية الحرجة للسائل بالنسبة إلى الهواء .

▪ 50 ملئ حوض للأسماك على هيئة متوازي مستطيلات بالماء وكانت حوائطه عبارة عن جدران زجاجية رأسية مسطحة من مادة بلاستيكية شفافة معامل انكسارها 1.6 . ما هي أقصى زاوية سقوط بالنسبة لشعاع ضوئي داخل الماء يرتطم بها الشعاع على الجدران البلاستيكية ويخرج إلى الهواء الخارجي ؟

▪ 51 يبلغ معامل انكسار ليفة بلاستيكية تستخدم في نقل إشارة عبر الألياف البصرية 1.45 . ما هي أدنى زاوية سقوط بالنسبة للعمود المقام على الجدران الأسطوانية لليفة وتحدث انعكاسًا داخليًا إذا كانت الليفة في (أ) الهواء و (ب) الماء .

▪ 52 وضع مصباح في منتصف قاع بركة سباحة كبيرة عمقها 2.0 m . ويشع المصباح ضوءه في جميع الاتجاهات . ويبدأ رجل من نقطة تقع فوق المصباح مباشرة في التجديف وهو في قارب (كانو) إلى أن يختفي المصباح من ناظريه . ما هي المسافة التي جدفها وهو بالقارب ؟ اعتبر أن جوانب البركة لا تعكس الضوء .

القسمان 11-23 و 12-23

53 كونت عدسة مجمعة بعدها البؤري 40 cm صورة لجسم ارتفاعه 2.0 cm . أوجد موضع وحجم وطبيعة الصورة عندما يكون بعد الجسم هو (أ) 100 cm ، (ب) 60 cm و (جـ) 30 cm . تحقق من إجاباتك برسم مسار الأشعة .

54 أوجد موضع وحجم وطبيعة الصورة التي تكونها عدسة مفرقة بعدها البؤري 30 cm− إذا كان الجسم الذي ارتفاعه 2.0 cm موضوعًا على بعد (أ) 80 cm ، (ب) 50 cm ، (جـ) 15 cm . تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة .

55 تكونت صورة لتمثال صغير ارتفاعه 4.0 cm بواسطة عدسة مفرقة بعدها البؤري 40 cm− . أوجد موضع وطبيعة الصورة وتكبيرها عند الأبعاد التالية للجسم : (أ) 90 cm ، (ب) 40 cm ، (جـ) 15 cm . تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة .

56 تستخدم عدسة مجمعة بعدها البؤري 45 cm لتكوين صورة لجسم ارتفاعه 3 cm . أوجد موضع وحجم وطبيعة صورة جسم موضوع على بعد : (أ) 120 cm ، (ب) 90 cm ، (جـ) 20 cm . تحقق برسم مسار الأشعة .

57 تكونت صورة تقديرية لجسم موضوع على بعد 40 cm من عدسة على مسافة 20 cm من العدسة . (أ) ما هو البعد البؤري للعدسة ؟ (ب) هل العدسة مجمعة أم مفرقة ؟

58 وضع جسم على بعد 60 cm إلى يسار عدسة مفرقة . وقد تكونت الصورة على بعد 30 cm إلى يسار العدسة . عين البعد البؤري للعدسة . ما هو التكبير ؟

59 استخدمت عدسة مجمعة بعدها البؤري 2.4 cm لفحص عينة بيولوجية موضوعة فوق شريحة مجهر (ميكروسكوب) . وقد كونت العدسة صورة للعينة على بعد 12.6 cm من الشريحة . ما هي المسافة بين العدسة والشريحة إذا كانت الصورة : (أ) حقيقية و (ب) تقديرية ؟

▪ 60 كونت عدسة مفرقة بعدها البؤري 30 cm− صورة تقديرية بعدها عن العدسة هو نصف بعد الجسم . (أ) ماذا يجب أن يكون بعد الجسم ؟ ما هو طول الصورة بالنسبة إلى ارتفاع الجسم ؟

▪ 61 (أ) أين يجب وضع جسم ما بالنسبة لعدسة مجمعة إذا كانت الصورة تبلغ ثلث (1/3) حجم الجسم ؟ (عبر عن إجاباتك بدلالة البعد البؤري f للعدسة) ؛ (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟

- 62 استخدمت عدسة مفرقة لتكوين صورة حجمها نصف حجم الجسم . أوجد موضع الجسم بدلالة البعد البؤرى للعدسة .
- 63 يراد استخدام عدسة منفردة لتكوين صورة تقديرية لجسم بحيث يكون طولها ثلاثة أمثال طول الجسم . (أ) ما نوع العدسة الواجب استخدامها ؟ (ب) أين يجب وضع الجسم ؟ (عبر عن الإجابة بدلالة البعد البؤرى للعدسة f) .
- 64 وضع جسم على بعد $8f$ من عدسة مفرقة بعدها البؤرى f . (أ) أوجد موضع الصورة . (ب) ما هو التكبير ؟
- 65 أعد المسألة رقم 64 بالنسبة لعدسة مجمعة .

القسم 23-13

66 وضعت عدستان مجمعتان بعد كل منهما البؤرى $f = 30$ cm بحيث كانت المسافة بينهما 80 cm (أ) أوجد البعد النهائى لصورة جسم موضوع على بعد 100 cm أمام العدسة الأولى . (ب) ما مقدار التكبير الكلى للمجموعة ؟ (جـ) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

67 وضع جسم على بعد 15 cm أمام عدسة مجمعة بعدها البؤرى 10 cm . ثم وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 8 cm- على بعد 50 cm بعد العدسة الأولى . (أ) أوجد الموضع النهائى وتكبير الصورة المتكونة بواسطة المجموعة . (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

68 وضعت عدسة مجمعة بعدها البؤرى 24 cm على بعد 36 cm أمام عدسة مفرقة بعدها البؤرى 36 cm– . ثم وضع جسم صغير على بعد 6 cm أمام العدسة المجمعة . أوجد (أ) موضع ، (ب) تكبير الصورة النهائية .

69 وضع جسم ارتفاعه 1 cm على مسافة 6 cm إلى يمين عدسة مجمعة بعدها البؤرى 12 cm . ثم وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 24 cm– على مسافة 10 cm إلى يسار العدسة المجمعة . أوجد موضع وحجم الصورة النهائية . وهل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

70 وضعت عدستان مجمعتان بعداهما البؤريين هما 10 cm ، 20 cm على الترتيب بحيث كانت المسافة بينهما 50 cm . ويراد تكوين صورة لجسم بين العدستين وعلى مسافة 30 cm أبعد من العدسة الأولى . (أ) أين يجب وضع الجسم حتى تتكون له تلك الصورة ؟ (ب) ما هو التكبير النهائى ؟ (جـ) هل الصورة النهائية معتدلة أم مقلوبة ؟

مسائل عامة

(تتعلق المسألتان 71 ، 72 بمعادلة صانع العدسات . راجع الملحوظة الدونة بالقسم 23-11) .

- 71 افترض إنك صنعت عدسة ثنائية التحدب من زجاج فلنت وكان نصفا قطر انحناء سطحيها هما $R_1 = 100$ cm ، $R_2 = 200$ cm . (أ) ما هو البعد البؤرى للعدسة إذا كانت موجودة فى الهواء ؟ (ب) وإذا كانت محاطة بالماء .
- 72 البعد البؤرى لعدسة مفرقة هو 55 cm– عندما تكون مغمورة فى البنزين . وبعدها البؤرى عندما تكون محاطة بالهواء هو 15 cm– . فإذا كان السطح الأمامى مسطحًا ($R_1 = \infty$) فما هو نصف قطر انحناء السطح الخلفى؟
- 73 وضع حجر ملون فى قاع حوض مستطيل مملوء بالبنزين . وكان العمق الظاهرى للحجر عندما يرى مباشرة من أعلى هو 40 cm . ما هو العمق الحقيقى للحوض ؟
- 74 وضع جسم على بعد 60 cm من حائل . ثم وضعت عدسة مجمعة بين الجسم والحائل لتكوين صورة للجسم على الحائل . فإذا كان البعد البؤرى هو 12 cm فأوجد . (أ) موضع العدسة و (ب) التكبير النهائى . هل هناك أكثر من إجابة للجزءين (أ) و (ب) .
- 75 إثبت أن معادلتى المرآة والعدسة يمكن التعبير عنهما بشكل بديل على الصورة : $s_i s_o = f^2$ ، حيث s_o و s_i هما بعدا الجسم والصورة عن البؤرة .

76 وضع جسم على بعد D من حائل . ثم استخدمت عدسة مجمعة لتكوين صورة للجسم على الحائل . اثبت أنه يوجد موقعان للعدسة على مسافة x من الجسم بحيث :

$$x = \frac{1}{2}D\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4f}{D}}\right)$$

وتحت أية ظروف لن تتكون صورة على الإطلاق ؟

77 وضع جسم على بعد 40 cm أمام عدسة مجمعة بعدها البؤرى 30 cm وتقع بدورها على بعد 60 cm أمام مرآة مستوية . أوجد جميع الصورة المتكونة بواسطة هذه المجموعة واذكر ما إذا كانت كل منها حقيقية أم تقديرية .

78 وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 10 cm- على مسافة 20 cm إلى اليسار من مرآة كرية مقعرة نصف قطر انحنائها 25 cm . فإذا وضع جسم على بعد 10 cm إلى اليسار من العدسة ، فأوجد كل الصور المتكونة بواسطة المجموعة واذكر ما إذا كانت كل منها حقيقية أم تقديرية .

الفصل الرابع والعشرون



البصريات الموجبة : التداخل والحيود

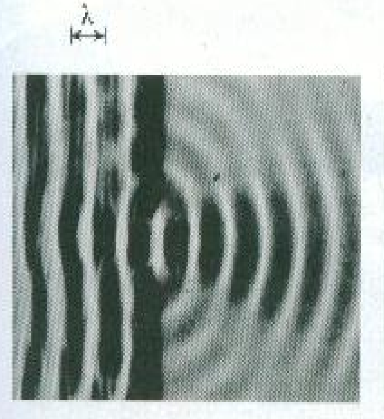
درسنا في الفصل السابق سلوك العدسات والمرايا مستخدمين مفهوم الأشعة الضوئية ، ولم نكن بحاجة لأن نعرف ما إذا كان الضوء مكونًا من جسيمات أو موجات حتى نكمل دراستنا . إلا أن هذا ليس صحيحًا بالنسبة للموضوعات التي سنتناولها في هذا الفصل . فسوف نرى أن الطبيعة الموجية للضوء تؤدي إلى ظواهر التداخل التي تشبه كثيرًا ما قابلناه عند دراسة الحركة الموجية الميكانيكية كالصوت والموجات المتكونة على وتر مشدود . إن مجرد وجود هذه الظواهر وتأثيرات أخرى سنقوم بدراستها أيضًا في هذا الفصل ، كفيل بأن يجعلنا نتقبل الطبيعة الموجية للضوء .

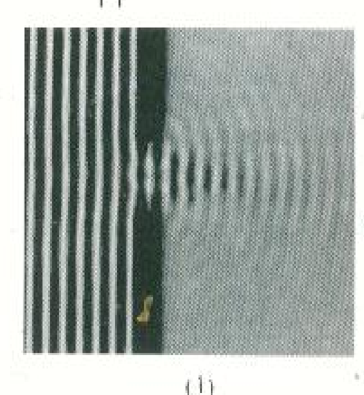
24-1 مبدأ هيجنز والحيود

هل تسنى لك أن تراقب موجات المياه الهادئة وهي ترتطم برفق بإحدى الدعامات أو بأي عائق في طريقها ؟ لو حدث ذلك فلابد إنك لاحظت أن الموجات تبدو كما لو كانت تنحني حول الدعامة بدلاً من تكوين ظل واضح لها . وهناك حالة مناظرة لهذا كالمبينة في الشكل 1-24 حيث نرى موجات مائية مستوية تم إثارتها بواسطة حوض التموجات

وترتطم الموجات بحاجز به ثقب صغير ، ثم تمر الموجات خلال الثقب وتنتشر لكي تملأ المنطقة الواقعة خلف الحاجز .

ويمكن ملاحظة هذا النوع من السلوك لا في حالة موجات المياه فحسب وإنما أيضًا في حالة موجات الصوت والموجات الكهرومغناطيسية . إنه سلوك مميز للموجات ويطلق عليه اسم خاص وهو الحيود :





شكل 1-24:
موجات مائية مستوية تسقط على ثقب في حاجز . ويتسبب الحيود في جعل الموجات تنتشر في المنطقة الواقعة وراء الحاجز كلها . ويلاحظ أنه عندما يصير الطول الموجي λ مساويًا بالتقريب لقطر الثقب فإن الحيود يكون أكثر وضوحًا .

تستطيع الموجات أن تنحني فيما وراء العوائق وتسمى هذه الظاهرة **الحيود** . وبعبارة أخرى فإن العوائق لا تتشكل لها ظلال حادة تمامًا بواسطة الموجات الساقطة .

وقد لجأ كريستيان هيجنز ـ وهو أحد معاصري نيوتن ـ أن يفترض ما يعرف الآن **بمبدأ هيجنز** لكي يفسر الحيود :

تعمل كل نقطة في جبهة الموجة كمصدر لمويجات صغيرة تنتشر في جميع الاتجاهات من تلك النقطة وذلك بسرعة الموجات في الوسط .

وجزء من قمة الموجة المبينة في الشكل 1-24 ، مثلاً ، يرتطم بالثقب الصغير في الحاجز مكونًا مصدرًا موجيًا جديدًا . ونتيجة لذلك تنتشر الموجات نحو الخارج من الثقب حتى تملأ كل المنطقة الواقعة خلف الحاجز .

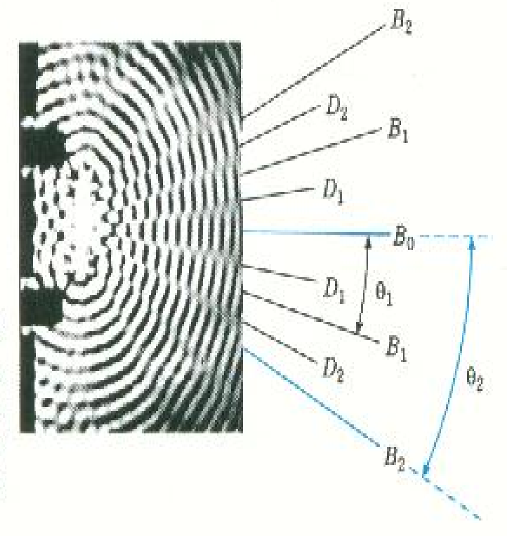
ويبدو كما لو كان الحيود لا يتفق مع ما نعرفه حول الموجات الضوئية وذلك لأن الأشياء التي تقف في مسار الضوء تتكون لها ظلال من السهل رؤيتها . وقد يكون حل هذا التناقض كامنًا في الشكل 1-24 . ويلاحظ أنه في الجزء (أ) من الشكل يكون الطول الموجي λ نحو ثلث عرض الثقب تقريبًا وتنتشر الموجات داخل منطقة الظل بشكل طفيف فحسب . أما عندما يصبح الطول الموجي أكبر من ذلك كما في الجزء (جـ) فإن الموجات تنتشر داخل منطقة الظل بشكل أوسع . وسوف نرجع إلى هذه الظاهرة فيما بعد .

24-2 التداخل

يصور الشكل 2-24 تجربة شيقة تتضمن التعامل مع موجات الماء . حيث يعمل مذبذبان كمصدرين نقطيين يبعثان بمجموعتين من موجات الماء المتماثلة على طول

سطح الماء . وعلينا ملاحظة ما يحدث عندما تتلاقى الموجات المنبعثة من المصدرين وتتفاعل معًا . فعلى امتداد خطوط معينة تنطلق من منتصف المسافة بين المصدرين (يرمز لها بالرمز B) يخلق التفاعل قممًا موجية كبيرة جدًا ، بينما لا ترى أية قمم موجية على طول خطوط أخرى (يرمز لها بالرمز D) . ويبدو أن الموجات المنطلقة من المصدرين يقوى بعضها بعضًا عند نقط معينة ويلغى بعضها بعضًا عند نقط أخرى . وسنبحث الآن فى أصل هذه الظاهرة .

نذكر من الفصلين الرابع عشر والخامس عشر أن الموجات المتشابهة إما أن يقوى بعضها بعضًا ، وإما يلغى بعضها بعضًا . ولكى نسترجع هذه الحقيقة سنعتبر أن لدينا موجتين A و B كما فى الشكل 3-24 . والموجتان المرسومتان فى الجزء (أ) متفقتان فى الطور أى أن قمة تقع فوق قمة وقاع يقع فوق قاع . وعندما تجمع الموجتان فإن الموجة المحصلة ستكون ضعف أى من الموجتين الأصليتين . إن الموجتين المبينتين فى (أ) تمران **بتداخل بنَّاء** .



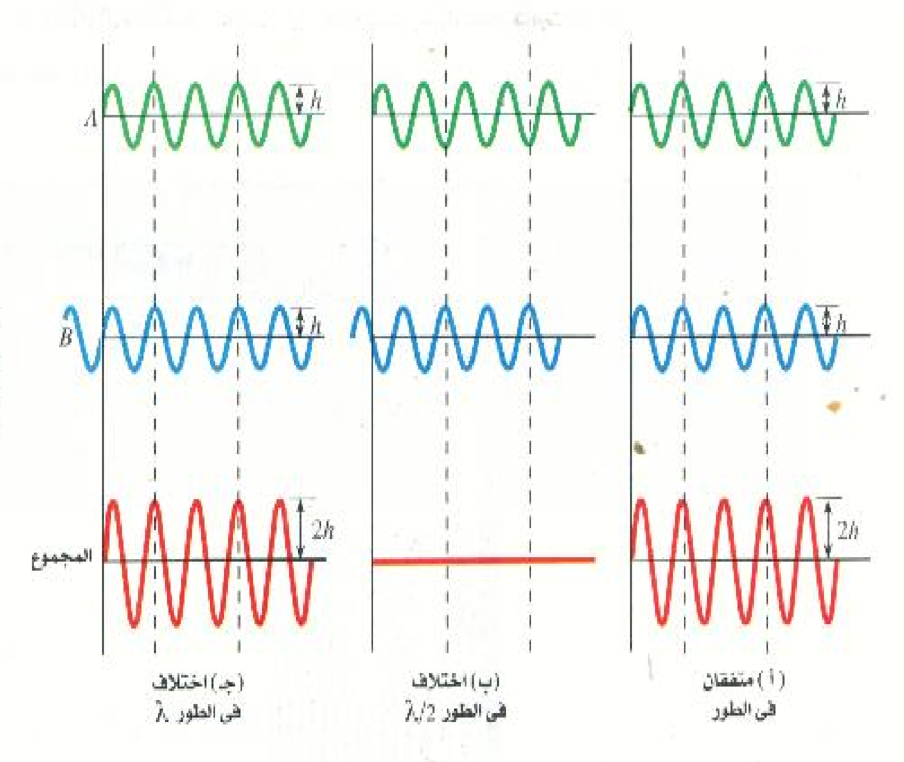
شكل 2-24:
يبعث المصدران المتزامنان موجات مائية متماثلة تتداخل بشكل بنَّاء على طول الخطوط المميزة بالحرف B وبشكل هدَّام على طول الخطوط المميزة بالحرف D .

أما الموقف المبين فى الجزء (ب) فهو مختلف تمامًا ، حيث تأخرت الموجة B بمقدار نصف طول موجى ، $\lambda/2$ ، بحيث تقع قمة فوق قاع بالنسبة للموجتين ، أى أن اختلاف الطور بين الموجتين هو $\lambda/2$ أو $180°$. ولذلك تلغى إحداهما الأخرى عند إجراء عملية الجمع وتكون الموجة المحصلة لهما صفرًا . ويقال فى هذه الحالة أن الموجتين تمران **بتداخل هدَّام** .

الجزء (جـ) من الشكل يصور تخلف الموجة B عن الموجة A بمقدار طول موجى كامل ، λ . وهكذا فالفرق فى الطور بين الموجتين هو λ أو $360°$ ، ويقع قاع فوق قاع وقمة فوق قمة وتجمع الموجتان لتؤديا إلى موجة محصلة أكبر مرتين من أى من الموجتين . . أى أن الموجتين تتداخلان بشكل بنَّاء .

نستنتج بشكل عام (كما فعلنا من قبل فى حالة الموجات الميكانيكية) **أن موجتين متماثلتين تتداخلان بشكل بنَّاء إذا كانتا متطاورتين (فى نفس الطور)** وإذا كانت إحداهما متأخرة بمسافة مقدارها λ ، 2λ ، 3λ ، إلخ بالنسبة للموجة الأخرى فإنهما

ستظلان تقوى إحداهما الأخرى عندما تجمعان وذلك لأن كل قمة ستظل واقعة فوق قمة . أما إذا كان التأخر النسبى هو $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ ، إلخ فإن قمة سوف تقع فوق قاع وتتداخل الموجتان بشكل هدَّام ؛ أى أن إحداهما تلغى الأخرى .



شكل 3–24:
يمكن لموجتين متماثلتين إما أن تقوى إحداهما الأخرى أو تلغيها اعتماداً على الطور النسبى بينهما .

وسنعود الآن إلى مناقشة التأثير الناتج عند اندماج مصدرين موجبين ، ونريد أن نكتشف السبب فى أن الموجات المنبعثة من هذين المصدرين تقوى فى مناطق معينة وتلغى فى مناطق أخرى . ومن السهل تناول هذه المسألة إذا رجعنا إلى الشكل 4–24 ، حيث يقع المصدران عند A و B ويرسلان موجات متماثلة فى جميع الاتجاهات . دعنا نعتبر أولاً الموجات التى يبعثان بها فى الاتجاه الأفقى ، كما فى الجزء (أ) . هذه الموجات متفقة فى الطور ، أى أن قمة تقع فوق قمة وقاعاً فوق قاع ولهذا فهى تقوى بعضها البعض ؛ وهذا هو السبب فى التقوية الحادثة على طول الخط B_0 فى الشكل 2–24 .

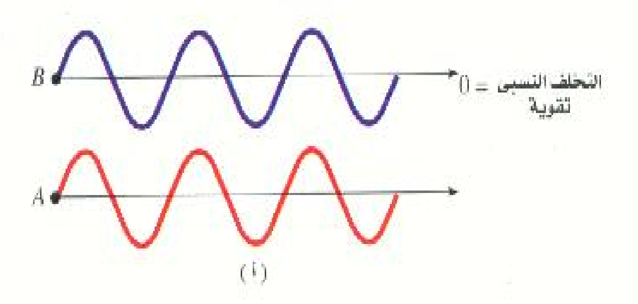
ثم لنعتبر الموجات المُرسلة فى الاتجاه المبين فى الشكل 4–24 (ب) ، حيث تتأخر الموجة الصادرة من B بمقدار $\lambda/2$ بالنسبة للموجة القادمة من A بحيث تقع قمم إحدى الموجتين فوق قيعان الموجة الأخرى . ونتيجة لذلك تتلاشى الموجات الصادرة عن المصدرين فى هذا الاتجاه ؛ مثلما يحدث على طول الخطين المميزين بالحرف D_1 فى الشكل 2–24 (عليك أن تفسر سبب وجود خطين مميزين بالحرف D_1) .

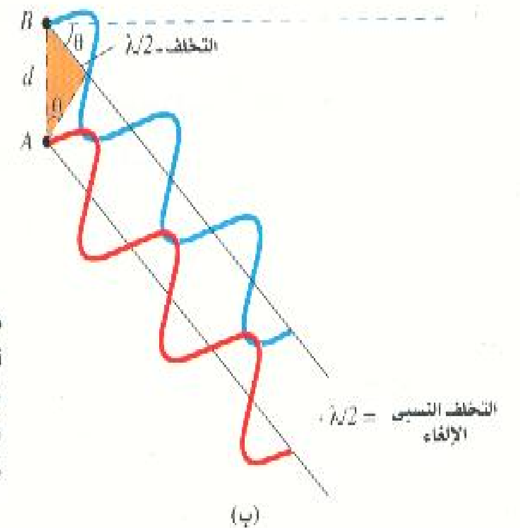
وإذا زادت الزاوية θ فى الشكل 4–24 فإن الموجة B ستتأخر أكثر فأكثر بالنسبة للموجة A ولكن عندما تزداد θ وبالتالى التخلف النسبى حتى يصبح التخلف بين الموجتين مساوياً لطول موجى λ فإن كلاً من الموجتين تقوى الأخرى مرة ثانية ، مثلما يحدث على طول الخطوط B_1 فى الشكل 2–24 .

ويمكنك إذا سرت على هذا المنوال من الاستدلال المنطقى أن تثبت لنفسك أن التخلف

النسبى يكون $3(\lambda/2)$ على طول خطوط الإلغاء D_2 ويكون 2λ على طول خطوط التقوية B_2 . وهكذا فإن B_0 ، B_1 ، B_2 وكل الخطوط المماثلة تمثل خطوطا تقوى فيها الموجات بعضها بعضًا . ويكون التخلف النسبى على طول هذه الخطوط هو 0 ، λ ، 2λ وهكذا .

سنقوم الآن باشتقاق معادلة رياضية تعبر عن الزوايا التى تحدث عندها خطوط التقوية ولهذا سنفحص المثلث الصغير المظلل فى الشكل 4-24 .





شكل 4-24:
تحدث التقوية عند الزوايا التى يكون التخلف فيها مساويًا λ ، 2λ ، 3λ . إلخ أما الإلغاء فيحدث عندما يكون التخلف النسبى هو $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ ، إلخ . .

يلاحظ أن الزاوية θ فى هذا المثلث مساوية للزاوية θ التى بين الأشعة والخط الأفقى وندرك على الفور من المثلث المظلل ـ أن

$$\text{التخلف النسبى} = d \sin \theta$$

حيث d هى المسافة بين المصدرين .

ولكى نحسب قيم الزوايا التى تحدث عندها تقوية ، علينا تذكر أن التخلف النسبى فى حالة التقوية لابد وأن يساوى 0 ، λ ، 2λ ، 3λ أو بشكل عام $n\lambda$ حيث n رقم صحيح . وعلى ذلك إذا كانت θ_n هى الزاوية التى تناظر تخلفًا نسبيًا مقداره $n\lambda$ فإن :

$$n\lambda = d \sin \theta_n \qquad (24\text{-}1)$$

فعلى سبيل المثال ، فإن $n = 0$ على طول الخط B_0 فى الشكل 2-24 (لأن الموجتين لا تتخلفان بالنسبة لبعضهما البعض ، ومن ثم $0 = d \sin \theta_0$ و $\theta_0 = 0$. ولدينا بالمثل $n = 2$ على طول الخط B_2 ولذلك $2\lambda = d \sin \theta_2$.

مثال توضيحى 1–24

افترض أن المسافة بين المصدرين المبينين فى الشكل 2–24 هو 2.0 cm وأن الطول الموجى هو 0.70 cm . ما هى الزاوية التى يحدث عندها خط التقوية B_2 ؟

استدلال منطقى : نعلم أن $d = 2.0$ cm وأن $\lambda = 0.70$ cm ويهمنا أن نعرف الموقف عندما $n = 2$. بالتعويض فى المعادلة (1–24) نجد :

$$\sin \theta_2 = \frac{(2)(0.70 \text{ cm})}{2.0 \text{ cm}} = 0.70$$

ونجد منها أن $\theta_2 = 44°$ ، أى أن الخطوط B_2 ستصنع زوايا مقدارها °44 مع الخط الأفقى .

تمرين : عند أية زاوية يوجد الخط B_1 ؟ **الإجابة** : °20.5 .

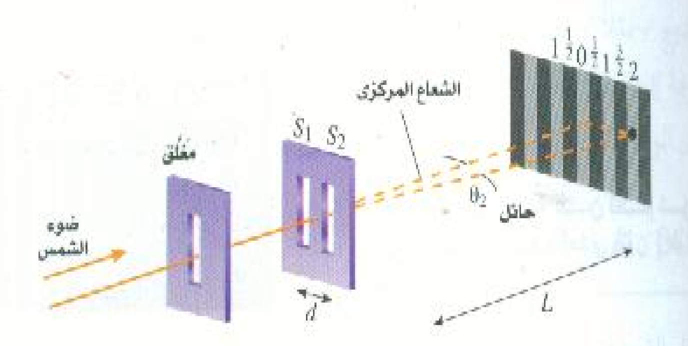
3–24 تجربة الشق المزدوج ليونج

ليست التجربة التى وصفناها فى القسم 2–24 حول تداخل موجات منتشرة من مصدرين ، خاصة بالموجات المائية فحسب . ولعلك تذكر من القسم 8–15 أن شعبتى الشوكة الرنانة يمكن أن يحدثا تداخلاً فى موجات الصوت وتفسير هذه الظاهرة شبيه بوصف موجات الماء المتداخلة فيما عدا أن الموجات الصوتية طولية بدلاً من أن تكون مستعرضة . وأية موجات مماثلة ، سواء أكانت مستعرضة أم طولية قادرة على إحداث ظواهر تداخلية .

وقد اعتقد نيوتن ، كما ذكرنا فى الفصل الثالث والعشرين ، أن الضوء مكون من جسيمات . لقد صور الضوء على أنه تيار من الجسيمات المنطلقة من مصادر الضوء ، والتى تنتقل فى خطوط مستقيمة . وعلى الرغم من أن العالم الإيطالى جريمالدى قد أثبت مبكرًا عام 1660 أن الضوء يمكن أن يعانى من الحيود ، إلا أن نيوتن تمكن من تفسير تلك المشاهدات فى إطار جسيمات الضوء . ولم تكن تلك التفسيرات مقنعة تمامًا إلا أن معظم الناس تقبلوها نظرًا لاحترامهم الشديد لشخص نيوتن . وظل الأمر كذلك حتى عام 1803 عندما أصبحت الطبيعة الموجية للضوء مقبولة على نطاق واسع .

ثم نشر العالم الإنجليزى توماس يونج (1773 – 1829) نتائج تجاربه عامى 1803 و 1807 والتى أوضح فيها تداخل الموجات الضوئية . فقد سمح لحزمة دقيقة من ضوء الشمس أن تمر خلال ثقب فى مَغْلق نافذة ثم تسقط على شقين ضيقين ومتوازيين تم عملهما فى قطعة من الورق المقوى كما هو موضح فى الشكل 5–24 . وقد شاهد نمطًا للتداخل مكونًا من مناطق متبادلة مضيئة ومظلمة تسمى **الهدبات** (أو الأهداب) على حائل موضوع خلف الشقين . وقد أتاحت له مشاهداته لهذه الأهداب وكذا تفسيره بأن الضوء ظاهرة موجية ، أن يحسب الطول الموجى للضوء للمرة الأولى . وسنتعرف الآن على الأسلوب الذى اتبعه لعمل ذلك .

إن الجدار الرأسى الموضوع عند الحافة اليمنى للشكل 2–24 هو الذى يُظهر نمطًا للموجات المائية . وتكون قمم موجات الماء عالية عند النقط المميزة بالحرف B ، أما حيث



شكل 5-24:
يعمل الشعاعان s_1 و s_2 كمصدرين للموجتين المتزامنتين في الطور . وبالنسبة للموجات الضوئية فإن هدبات التداخل عادة ما يفصل بين كل اثنتين منها بضع ملليمترات قليلة . (قارن هذه التجربة مع الشكل 2-24 الخاص بالموجات المائية) .

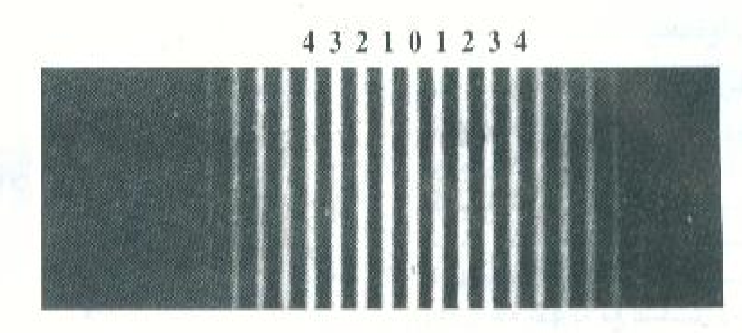
تلتقي الخطوط المميزة بالحرف D بالجدار فإن الماء يكون ساكنًا . والأهداب المضيئة في الشكل 5-24 تناظر المواقع المميزة بالحرف B في نمط تداخل الموجات المائية (المتخيل) في الشكل 2-24 . والمواقع المميزة بالحرف D تناظر ـ كما لعلك قد ظننت ـ الأهداب المظلمة في نمط الشق المزدوج ليونج .

يمكننا الآن تفسير نمط يونج مستخدمين التناظر مع تجربة تداخل موجات الماء كما يلي . فالشقان يعملان عمل مصدري الضوء اللذين يبعثان موجات متماثلة . والهدبة المميزة بالحرف O تكون مضيئة لأن الموجات التي تصل إلى هذا الموقع تقوي إحداها الأخرى ويكون التخلف النسبي بينها صفرًا .

أما عند الهدبتين 1 و 2 فإن الموجتين تقويان مرة أخرى . وتنتمي هاتان الهدبتان إلى المنطقتين B_1 و B_2 في الشكل 2-24 ولهذا فإن فرق الطور النسبي بين الموجتين الواصلتين إلى هناك يكون λ بالنسبة للمنطقة B_1 و 2λ للمنطقة B_2 . وحيث أن الواقف في الشكلين 2-24 و 5-24 متماثلة تمامًا فإننا نستطيع أن نطبق المعادلة 1-24 هنا على أهداب الشق المزدوج ليونج أو $n\lambda = d \sin \theta_n$ ، حيث n هو رقم الهدبة كما يرمز إليه في الشكل 5-24 و d هو المسافة بين الشقين ، أما λ فهو الطول الموجي للضوء . ومثلما كانت θ_2 هي الزاوية بين الشعاع الواصل إلى الهدبة المركزية (0) والشعاع الواصل إلى الهدبة 2 فإن θ_n هي الزاوية بين الشعاع المركزي والشعاع الواصل إلى الهدبة n . وكثيرًا ما يطلق على « n » رقم رتبة الهدبة . وطبقًا لهذا الاصطلاح فإن هدبة θ_2 تصبح **هدبة من الرتبة الثانية** .

وهكذا تمكن يونج من استخدام المعادلة 1-24 في حساب الطول الموجي للضوء . وكان الضوء المستخدم في التجارب هو ضوء الشمس الذي يحتوي على الأطوال الموجية المرئية . وحيث أن المعادلة 1-24 تقتضي أن يحدث كل طول موجي هدبة مضيئة عند زاوية مختلفة ، لذا فإن هدبات يونج كانت عبارة عن شرائط مكونة من كل ألوان الضوء المرئي حيث الحافة الزرقاء للشريط أقرب ما تكون في المنتصف بينما تكون الحافة الخارجية حمراء . أما إذا كان الضوء أحادي اللون (أي ذا طول موجي واحد) مثل الذي يوفره الليزر ، فإن الهدبات الناتجة تكون ذات لون واحد ومحددة بشكل واضح كما يبين ذلك الشكل 6-24 .

سنتناول الآن نتائج تجربة نموذجية حيث كانت L في الشكل 5-24 120 cm ، وكانت المسافة d بين الشقين $d = 0.025$ cm ، أما المسافة بين مركز نمط التداخل إلى



شكل 6-24:
هدبات التداخل الناتجة عن نظام شق مزدوج باستخدام ضوء أحادى اللون (طول موجى منفرد) .

المركز التقريبى للهدبة رقم 2 هو 0.50 cm . ولكى نحسب θ_2 فإننا نرجع إلى الشكل 5-24 فنجد أن :

$$\tan \theta_2 = \frac{\text{المسافة } 0 \leftarrow 2}{L} = \frac{0.50 \text{ cm}}{120 \text{ cm}} = 0.00417$$

ومنها نجد أن $\theta_2 = 0.24°$.

وقد استخدم يونج مثل هذه البيانات لكى يحسب الطول الموجى للضوء بالقرب من مركز هدبة نموذجية ، وقد حصل عند التعويض فى المعادلة 1-24 على :

$$\lambda = \frac{d}{n} \sin \theta_n = \frac{0.025 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} \sin 0.24 = 5.2 \times 10^{-7} \text{ m}$$

وعندئذ أصبح قادرًا على استنتاج أن الطول الموجى للضوء المرئى يبلغ نحو 500 nm حيث يكون الطول الموجى للضوء الأزرق أقصر نوعًا ما من هذا وللضوء الأحمر أطول قليلاً من هذا .

من الصعب علينا أن نغالى فى أهمية التداخل وخاصة فى حالة الضوء ؛ فموجات التردد الواحد ، تمتلك فى طولها الموجى « أداة ذاتية » لقياس الطول . **فنحن غير قادرين على اكتشاف شكل الموجة عندما نرى الضوء ولكن نمط التداخل هو الذى يكشف عن الطول الموجى .** والأطوال الموجية للضوء المرئى صغيرة جدًا إذا قورنت بدقة أجهزة القياس العادية المستخدمة لقياس الأطوال ، ولذلك يصبح استخدام الضوء كمعيار قياسى ذا فوائد عظيمة . وتسمى الأجهزة التى تستخدم أنماط التداخل لتعيين الأطوال « **أجهزة قياس التداخل** » وبواسطتها أمكن الحصول على أدق القياسات للأطوال .

لقد استخدمنا فى وصف تأثيرات التداخل موجات متشابهة ، تتماثل فى الشكل وفى الطول الموجى . كما أننا اعتبرنا دائمًا أن للموجة علاقات طور محددة مع غيرها من الموجات . ويقال لموجتين من تلك الموجات إنهما متماسكتان أو مترابطتان .

للموجات المترابطة نفس الشكل والطول الموجى كما أن بين بعضهما البعض علاقات طور محددة .

ويطلق على مصادر الموجات المترابطة اسم المصادر المترابطة .

وحيث أن مصدرى الضوء غالبًا ما يكونان غير مترابطين ، فمن الضرورى دائمًا أن نقسم الحزمة الضوئية المنفردة إلى قسمين للحصول إلى نمط للتداخل . ففى تجربة الشق

الزدوج ، مثلاً ، يضاء الشقان بنفس الحزمة الضوئية أو نفس موجة الضوء ، وتقسم هذه الموجة إلى قسمين محددين بواسطة الشقين . وحيث أن الموجتين الناتجتين هما أجزاء من نفس الموجة فإنهما تكونان مترابطتين وتؤديان إلى الآثار التداخلية التى أشرنا إليها آنفاً .

24-4 المسار البصرى المكافئ

ينتقل الضوء فى الفراغ بأقصى سرعة c كما بيننا فى القسم 9-23 ، فإذا دخل إلى وسط شفاف معامل انكساره n فإن سرعته تنخفض إلى $v = c/n$. إلا أن تردد الضوء لن يتغير* .
وحيث أن الطول الموجى فى الوسط هو : $\lambda_m = v/f = c/nf$ ؛ بينما هو فى الفراغ $\lambda_{vac} = c/f$ فإن :

$$\lambda_m = \frac{\lambda_{vac}}{n} < \lambda_{vac} \qquad (24\text{-}2)$$

يكون الطول الموجى للضوء المنتشر فى وسط ما أقصر مما إذا انتشر الضوء فى الفراغ .

أى أن الوسط - عندما يقوم بإبطاء الضوء المار من خلاله - فإنه فى الواقع يضم الموجات إلى بعضها البعض كما هو موضح فى الشكل 7-24 . وعلينا تذكر أن كل طول موجى إنما يمثل دورة طور كاملة للضوء . ويعنى ضم الموجات إلى بعضها أنه لو كان للضوء عدد من الدورات فى طول مقداره L فى الفراغ ، **فإنه سيحتوى على نفس عدد الدورات فى طول أقصر إذا مر من خلال وسط شفاف .**

ويؤدى بنا هذا إلى مفهوم مهم ، سوف نطلق عليه **المسار البصرى المكافئ** للوسط . وسوف نقوم الآن بحساب عدد الأطوال الموجية الواقعة داخل سمك مقداره L لوسط معامل انكساره n وذلك بالنسبة لطول موجى معين للضوء :

عدد الأطوال الموجية فى سمك مقداره L لوسط ما $= \dfrac{L}{\lambda_m} = \dfrac{L}{\lambda_{vac}/n} = \dfrac{nL}{\lambda_{vac}}$

وذلك باستعمال المعادلة (2-24) و أما عدد الأطوال الموجية . داخل مسافة مقدارها L فى الفراغ فهو L/λ_{vac} . وعلى ذلك فإنه بدلالة عدد الأطوال الموجية فى مسافة معينة ومن ثم بدلالة مقدار التغير فى الطور الناتج ، يمكننا استنتاج ما يلى :

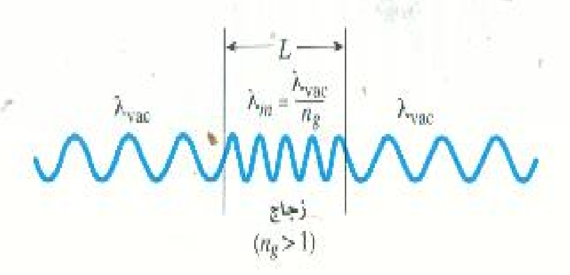
إن مسارًا طوله L فى وسط ما ، معامل انكساره n ، يحدث نفس اختلاف الطور فى الضوء ، مثلما يفعل مسار مقداره nL فى الفراغ .

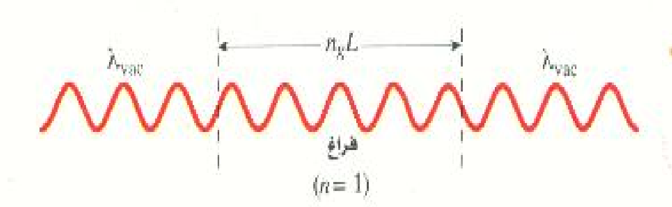
أى أن المكافئ البصرى لمسار مقداره L فى وسط ما معامل انكساره n هو :

$$L_{opt} = nL \qquad (24\text{-}3)$$

* إن كل قمة موجة ترتطم بالحد الفاصل بين الفراغ والوسط تعتبر ، طبقاً لمبدأ هيجنز ، مصدرًا جديدًا للموجات ، ويبقى تردد الموجات التى تخترق الحد الفاصل دون تغيير أى يظل التردد هو نفس تردد الموجات الساقطة .

وتمدنا معرفتنا بالمعادلة (3-24) بوسيلة ميسورة لإيجاد التغير فى الطور فى موجة ضوئية طولها فى الفراغ هو λ_{vac} ، والناشئ عندما يمر الضوء عبر سمك مقداره L من الوسط : أنه عدد الأطوال الموجية فى الفراغ والتى يحتويها سمك بصرى مكافئ .





شكل 7-24:
يحتوى سمك مقداره L من زجاج معامل انكساره n_g نفس عدد الأطوال الموجية التى يحتوى عليها سمك مقداره n_gL فى الفراغ . أى أن للزجاج سمك بصرى مكافئ مقداره n_gL .

$$\text{التغير في الطور (مقدرًا بعدد الدورات)} = \frac{L_{opt}}{\lambda_{vac}} = \frac{nL}{\lambda_{vac}}$$

وهذا الرقم ليس بالضرورة أن يكون صحيحًا بالطبع ، إذا قد يكون كسرًا من دورة أيضًا .

وتتجلى أهمية مفهوم المسار البصرى المكافئ عند مناقشة الكثير من جوانب التداخل كما سنرى فى القسم التالى .

مثال 24-1

ما هى قيم سمك زجاج فلنت والألماس المكافئة لمسافة مقدارها 1.00 cm من الفراغ ؟ وما هو الطول الموجى الذى يتخذه ضوء طوله الموجى $\lambda = 600$ nm إذا مر عبر هاتين المادتين .

استدلال منطقى :

1

سؤال : كيف يمكن ترجمة السؤال الأول فى إطار الكميات التى تعرف المسار البصرى المكافئ لوسط ما ؟

الإجابة : يرتبط السمك البصرى المكافئ لمادة ما L_{opt} بالسمك الحقيقى بالعلاقة $L_{opt} = nL$ (المعادلة 3-24) ومطلوب منك أن تجد السمك الحقيقى للمادة التى تسلك بصريًا مثل 1.00 cm من الفراغ وبعبارة أخرى ، أن تجد قيمة L المناظرة لقيمة $L_{opt} = 1.00$ cm .

سؤال : هل أتوقع أن تكون قيم السمك البصرى أكبر أم أقل من 1.00 cm ؟

الإجابة : المادة التى معامل انكسارها $n > 1$ تقصر الطول الموجى للضوء الذى يخترقها . ولهذا فإن نفس عدد الدورات سيُحتوى داخل سمك **أقصر** من المسافة فى الفراغ .

سؤال : كيف يرتبط الطول الموجى فى وسط ما بمعامل انكسار ذلك الوسط ؟

الإجابة : فى داخل وسط ما ، يكون $\lambda_m = \lambda_{vac}/n$ ، حيث λ_{vac} هو الطول الموجى فى الفراغ .

الحل والمناقشة : بالنسبة للسمك البصرى L_{opt} الذى مقداره 1.00 cm فإن القيم الحقيقية للسمك L هى :

$$L\,(\text{زجاج}) = \frac{L_{opt}}{n} = \frac{1.00}{1.52} = 6.58\ \text{mm}$$

$$L\,(\text{ألماس}) = \frac{1.00\ \text{cm}}{2.42} = 4.13\ \text{mm}$$

ويحتوى 1.00 cm من الفراغ على :

$$\frac{1.00\times10^{-2}\ \text{m}}{6.00\times10^{-9}\ \text{m}} = 1.67\times10^{4}$$

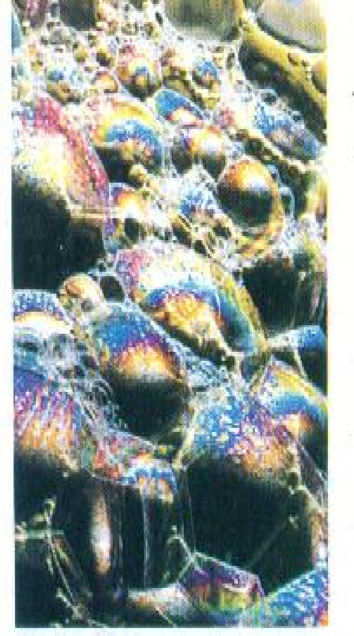
أى 1.67×10^4 طولاً موجيًا أو دورة . ولكى يكون السمك الحقيقى مكافئًا بصريًا فإنه يحتوى على نفس العدد من الأطوال الموجية . وفى الحالة الراهنة فإن 6.58 mm من الزجاج مكافئة بصريًا لسمك مقداره 4.13 mm من الألماس ، ويحتوى كل من السمكين على 1.76×10^4 طولاً موجيًا .

ويتحدد الطول الموجى فى كل من الوسطين بالعلاقة 2-24 :

$$\lambda_m\,(\text{زجاج}) = \frac{600\ \text{nm}}{1.52} = 395\ \text{nm}$$

$$\lambda_m\,(\text{ألماس}) = \frac{600\ \text{nm}}{2.42} = 4.13\ \text{nm}$$

5-24 التداخل فى الأغشية الرقيقة



توضح فقاعات الصابون ظاهرة التداخل فى الأغشية الرقيقة . وتعتمد الأطوال الموجية لموجات الضوء التى نراها متداخلة بشكل بناء ، وهى ترتد من السطحين العلوى والسفلى للفقاعة ، على الزاوية التى ننظر بها إلى الفقاعة . ولهذا فإننا نشاهد ألوانًا متباينة نتيجة لظاهرة التداخل عندما ننظر إلى مناطق مختلفة من الفقاعة .

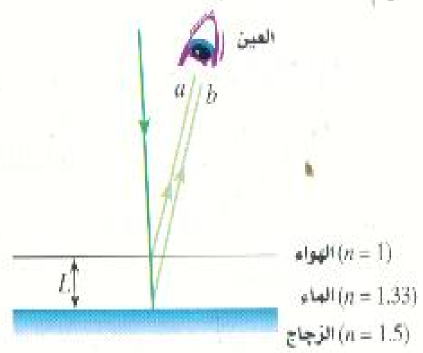
إن الهدبات الملونة التى كثيرًا ما نراها فى أغشية الزيت أو الصابون ، من أكثر مظاهر التداخل شيوعًا وانتشارًا ، وسنقوم الآن بتحليل هذا النوع المهم من التداخل .

يبين الشكل 8-24 غشاءً رقيقًا من الماء سمكه L فوق شريحة زجاجية والضوء الذى نراه منعكسًا من الغشاء قد انعكس جزء منه من السطح العلوى للماء وجزء آخر من السطح الفاصل بين الزجاج والماء . ويمثل الشعاعان a و b هذين الانعكاسين . ولكى نبسط المناقشة فقد جعلنا الشعاعين يكادان أن يكونا متعامدين على الغشاء حتى لا نضطر إلى معالجة انكسار الأشعة .

والشعاعان a و b مترابطان لأنهما جزء من نفس الحزمة الساقطة ، ومن ثم فهما متفقان فى الطور عندما يلتقيان بالسطح العلوى للغشاء المائى . ويتباطأ الشعاع b عندما يمر عبر الغشاء ، بالنسبة للشعاع a ، لأن عليه أن يخترق سمك الغشاء مرتين (فى رحلة طولها $2L$) قبل أن يغادر الماء ويلتقى بالشعاع a ليتحد معه . أى أن اختلافًا فى الطور بين الشعاعين قد نشأ ، يعتمد على **طول المسار البصرى المكافئ** الذى يقطعه الشعاع b . وهذا الاختلاف فى الطور ـ طبقًا لما قدمناه فى القسم السابق ـ هو :

$$\text{الفرق فى الطور بين الشعاعين } a \text{ و } b = \frac{L_{opt}}{\lambda_{air}} = \frac{2nL}{\lambda_{air}}$$

فإذا كان هذا الفرق مساويًا لعدد صحيح ، فإن الشعاع b سيتحد **في نفس الطور** مع الشعاع a عندما يعود الشعاع b ويخترق السطح العلوى للغشاء ولهذا فإن الضوء المنعكس من سطحي الغشاء سيكون **ساطعًا** ، أما إذا كان المقدار $2L_{opt}$ عددًا فرديًا من **أنصاف** الأطوال الموجية ($\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ . . إلخ) فإن التحام الشعاعين سيكون مختلفًا في الطور بنصف دورة مما ينتج عنه تداخل هدام .



شكل 8–24:
تنتقل الأشعة الضوئية المنعكسة من السطحين العلوى والسفلى لغشاء رقيق لمسافات مختلفة قبل أن تلتحم معًا ، وترى العين ظاهرة التداخل الناتجة .

وسمك الأغشية الرقيقة عادة ما يكون مقاربًا أو أقل من الأطوال الموجية للضوء المرئي ولذلك ، إذا أضيء الغشاء بضوء أبيض ، فإن التداخل البناء قد يحدث لأحد الأطوال الموجية فقط دون باقي الأطوال الموجية الصادرة عن المصدر . ويرى الغشاء بواسطة الضوء المنعكس ملونًا نتيجة لذلك .

هناك أيضًا مصدر آخر لحدوث اختلاف أو فرق في الطور عند تناول الانعكاسات ولعلك تذكر من مناقشاتنا للموجات المتكونة في الأوتار : أننا لاحظنا انقلاب الموجة (أى تغيرًا في الطور مقداره $180°$ أو نصف دورة) عندما تنعكس عند الطرف المثبت للوتر . أما الموجة المنعكسة من طرف حر للوتر فلا تعاني من أى تغير في الطور . وتحدث ظاهرة مماثلة عندما ينعكس الضوء على الحد الفاصل بين مادتين لهما معاملا انكسار مختلفان .

إذا انعكس ضوء ينتقل في وسط معامل انكساره n_1 على وسط آخر معامل انكساره أكبر ($n_2 > n_1$) فإن الموجة المنعكسة ستختلف في الطور بنصف دورة بالنسبة للموجة الساقطة . أما إذا كان $n_1 > n_2$ فإن الموجة المنعكسة لن تعاني أى اختلاف في الطور .

وهذا الاختلاف في الطور سيكون بالإضافة إلى اختلاف الطور الناشئ عن المسارات البصرية غير المتساوية .

وتعتمد كيفية تداخل الأشعة عندما تتحد على **الفرق الكلي** في الطور . فإذا كانت الأشعة تعانى من فرق في الطور مقداره $180°$ أو صفر عند الانعكاس فإن العامل الوحيد الذى يحدد التغير الكلي في الطور هو الفرق في طول المسار البصرى المكافئ ، كما سبق وناقشنا . إلا أنه إذا عانى أحد الشعاعين أو غيره من تغير في الطور نتيجة الانعكاس بينما لا يعانى الشعاع الآخر ، فإن هذا التغير لابد من إضافته إلى الفرق الناتج من اختلاف طول المسار .

وتلخيصًا لما سبق نقول أنه لحساب شروط التداخل بالنسبة للضوء المنعكس من غشاء رقيق فإن الواجب :

1 أن نحدد معاملات انكسار المادة التي يسقط منها الضوء والغشاء والمادة التي يستقر الغشاء فوقها . وأن نستخدم هذه المعلومات لتحديد ما إذا كان هناك تغير في الطور نتيجة للانعكاس .

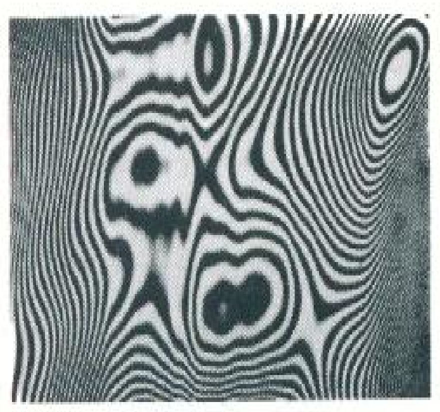
2 إذا لم يكن هناك تغير في طور أي من الشعاعين أو في كليهما عند الانعكاس فإن انعكاسًا ساطعًا سيحدث عندما يكون المسار البصري لرحلة الضوء عبر الغشاء (جيئة وذهابًا) مساويًا لعدد صحيح من الأطوال الموجية .

3 إذا عانى أي من الشعاعين من تغير انعكاسي في الطور لنتج انعكاس ساطع عندما يكون المسار البصري لرحلة الشعاع عبر الغشاء (جيئة وذهابًا) مساويًا لعدد فردي من أنصاف الأطوال الموجية .

ويعتبر غشاء الماء الذي يحيط به الهواء من فوقه ومن أسفل منه ، مثالاً على الحالة الأخيرة (رقم 3) . حيث يحدث تغير في الطور مقداره نصف دورة عند الانعكاس بالنسبة للشعاع a ، في حين لا يحدث أي فرق في الطور بالنسبة للشعاع b .

ويلاحظ أن شرط حدوث تداخل بنّاء يتحول إلى تداخل هدّام عندما يتغير سمك الغشاء L بمقدار $\lambda/4$. وعلى الرغم من أن هذا التغير في السمك طفيف جدًا . إلا إن ملاحظته ميسورة جدًا وعلى هذا يصبح للتداخل الكثير من التطبيقات المبينة على أساس قدرته على اكتشاف أي تغير طفيف للغاية في الأبعاد .

كما يعتبر اختبار استواء السطوح من التطبيقات المهمة وذلك باستخدام مقاييس عيارية تعرف **بالأسطح بصرية الاستواء** . وهي تصنع من ألواح زجاجية ذات سطحين متوازيين تمامًا بدقة تصل إلى كسر من طول موجي للضوء المرئي . ويتم الاختبار بوضع سطح بصري الاستواء فوق عينة المادة المراد التأكد من أنها مستوية تماما . ثم يسلط ضوء أحادي اللون على السطح بصري الاستواء ، فإذا كانت العينة ذات سطح غير مستو تمامًا ، فإن غشاء رقيقًا من الهواء سيحتجز بين السطح بصري الاستواء والعينة . ويظهر التباين في سمك هذا الغشاء الرقيق نتيجة عدم استواء سطح العينة على هيئة هدبات تداخل ساطعة ومظلمة كما يوضحها الشكل 24-9 .



شكل 9-24:
منظر للهدبات المشاهدة نتيجة وجود غشاء هوائي على هيئة أسفين بين شريحتين زجاجيتين ليستا مستويتين . وتنتمي كل هدبة مظلمة إلى منطقة يتساوى فيها سمك الغشاء ؛ والتغير في السمك بين هدبتين متجاورتين هو $\lambda/2n$. وتشير الهدبات إلى أن الشريحتين مستويتان تقريبًا بالقرب من الطرف الأيسر فقط .

وعندما تختفي كل الهدبات ، فإن معنى ذلك أن العينة صقلت إلى درجة من الاستواء تماثل استواء السطح العياري إلى درجة من الدقة تصل إلى ما يقرب من $\lambda/4$ للضوء المستخدم .

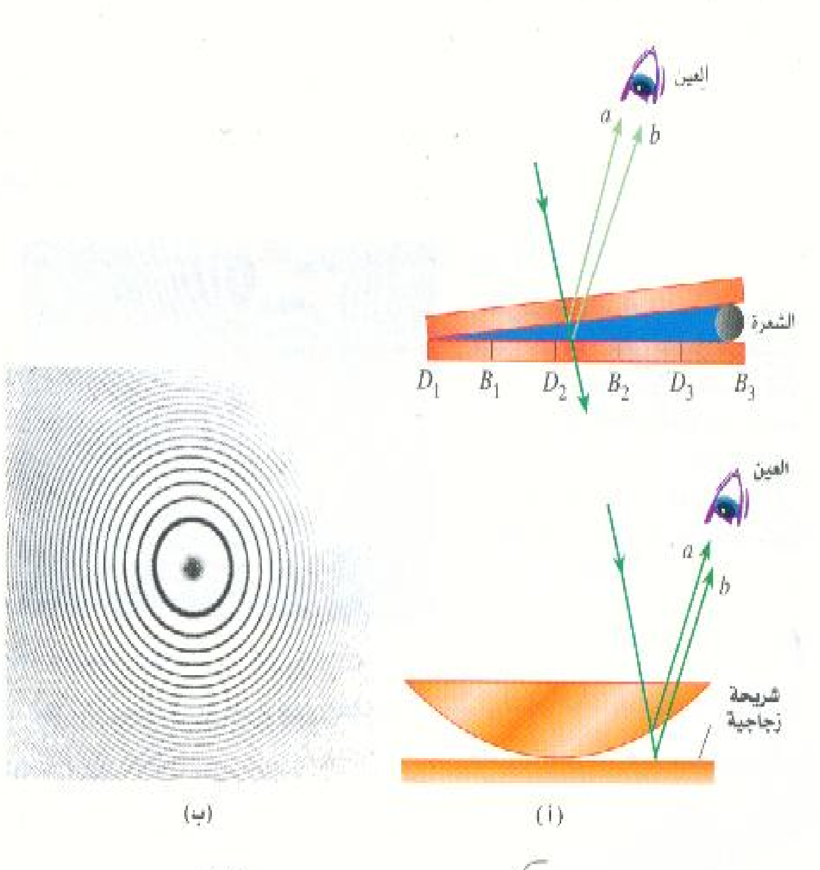
ويعتبر استخدام الأسطح بصرية الاستواء في قياس أشياء رقيقة للغاية مثالاً آخر على ظاهرة تداخل الأغشية الرقيقة وتطبيقاتها . افترض أننا وضعنا شعرة بين طرفي شريحتين

زجاجيتين مستويتين بصريًا كما هو مبين بالشكل 10-24 ، بحيث تتكون طبقة من الهواء على هيئة إسفين بين السطحين المستويين . وعندما يسلط ضوء أحادى اللون من أعلى هذا الأسفين فإننا سنلاحظ سلسلة من هدبات التداخل الساطعة والمظلمة بالتبادل عبر الشريحتين ، وموازية للشعرة كما هو مبين فى الشكل 10-24 . وتكون الهدبة الواقعة عند الحافة حيث تتلامس الشريحتان معتمة (D_1 فى الشكل 10-24) لأن اختلاف الطور الوحيد هنا هو الناشئ عن انعكاس الشعاع b من الشريحة السفلى ويمثل التباعد بين مركزى هدبتين مظلمتين متجاورتين زيادة مقدارها $\lambda/2$ فى سمك الأسفين الهوائى . (عليك أن تفسر صحة هذا الأمر) . أما إذا كان هناك ثلاث هدبات مظلمة من الطرف الذى تتلامس عنده الشريحتان حتى الطرف حيث تفصلهما الشعرة ، فإن تباعد الشريحتين الناشئ عن وجود الشعرة سيكون $3\lambda/2$. فإذا كان نمط التداخل هذا قد نتج عن ضوء طوله الموجى 600 nm ، مثلاً ، فلابد أن نستنتج أن سمك الشعرة 900 nm أو $0.900\ \mu m$.

أجريت التجربة المبينة فى الشكل 11-24 على يدى نيوتن وهى الأخرى تصور التداخل فى الأغشية الرقيقة . وتبدأ هذه التجربة بوضع عدسة مستوية ـ محدبة (انحناؤها أقل بكثير عما هو مبين بالرسم) على شريحة زجاجية مستوية ويسلط عليها ضوء أحادى اللون من أعلى . وتؤدى الأشعة المنعكسة نحو العين من سطحى الإسفين الهوائى المتكون بين العدسة والشريحة إلى تكون نمط للهدبات كالمبين فى الشكل 11-24 وهو ما اصطلح على تسميته **بحلقات نيوتن** . ويعزى تكون هذا النمط إلى نفس السبب المذكور فى الحالة المبينة فى الشكل 10-24 . فيما عدا أن الهدبات مستديرة بسبب الهندسة الدائرية للإسفين الهوائى الذى تكونه العدسة .

شكل 10-24:
يفصل بين طرفى الشريحتين إلى اليمين شعرة . والشريحتان مستويتان بصريًا . أما الشعرة فإنها تكون فجوة هوائية على هيئة إسفين بين الشريحتين . وتتسبب هذه الفجوة فى خلق نمط تداخل عند تسليط ضوء أحادى اللون على الشريحتين من أعلى (وقد بينّا شعاعًا ساقطًا واحدًا وآخر منعكسًا من أجل الإيضاح ، ولكنك تدرك ـ بالطبع ـ أن الضوء يسقط وينعكس عبر الشريحتين بأكملهما) .

شكل 11-24:
(أ) يتداخل الشعاع a ، المنعكس من السطح السفلى للعدسة مع الشعاع b المنعكس من الشريحة الزجاجية .
(ب) يسمى نمط التداخل الناتج عن هذا التداخل بحلقات نيوتن . لماذا كان مركز النمط مظلمًا ؟ (لقد تم تغيير الزوايا فى الشكل (أ) حتى يمكن توضيح الشعاعين المنعكسين) .



مثال 2-24 :

تغطى العدسات أحيانًا بطبقة رقيقة من فلوريد المغنسيوم ($n = 1.38$) للإقلال من الانعكاس وبذلك تقوى شدة الضوء النافذة . ما هو سمك أرق طبقة يمكنها أن تحدث الحد الأدنى من الانعكاس لضوء طوله الموجى 550 nm ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يعنى « الحد الأدنى من الانعكاس » بالنسبة للمصطلحات التى تناولناها عند مناقشة الأغشية الرقيقة ؟

الإجابة : إنه سمك الغشاء الذى يتسبب فى تداخل هدّام بين الأشعة المنعكسة من سطحى الغشاء .

سؤال : ما هى الأشعة التى ستعانى من اختلاف فى الطور عند الانعكاس ؟

الإجابة : يمكنك ـ من الجدول 2-23 ـ أن تعرف أن $n_{glass} > n_{MgF_2}$. ولذلك فإن الانعكاس من على سطحى MgF_2 سينتج اختلافًا فى الطور مقدار نصف دورة .

سؤال : ما هو الشرط المطلوب فى طول المسار اللازم لإحداث تداخل هدّام ؟

الإجابة : إن الاختلاف الكلى فى الطور ناشئ بأكمله عن الاختلاف فى طول المسار البصرى .

سؤال : ما هو الشرط الذى يحقق أرق طبقة ؟

الإجابة : ستؤدى قيم السمك المختلفة إلى تداخل هدّام ، بينما ينتمى **الحد الأدنى** للسُمك للعلاقة $2nL = \lambda/2$.

الحل والمناقشة : إذا عبرنا عن الحل بالأرقام فإن :

$$2\,(1.38)L = \frac{(550\text{ nm})}{2}$$

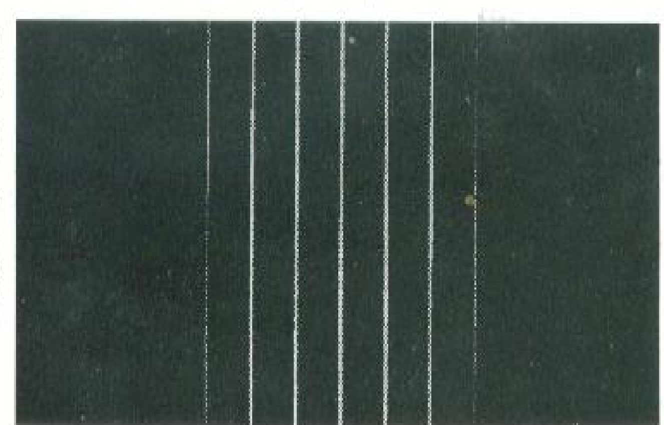
$$L = 99.6\text{ nm}$$

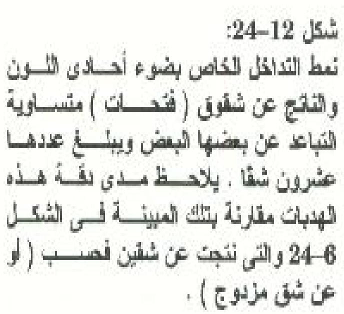
ويشار إلى طبقة الطلاء المضاد للانعكاس باسم طبقة **ربع الموجة** ، ويلاحظ أن شرط الحد الأدنى من سمك الطبقة هو نفسه $nL = \lambda/4$. ومن ثم يكون **السمك البصرى** للغشاء مساويًا $\lambda/4$.

6-24 محزوز الحيود

على الرغم من أن العالم يونج قد قام بتجربة الشق المزدوج لقياس الطول الموجى للضوء ، إلا أن النمط الذى حصل عليه للشق المزدوج كان على درجة من التشوش بحيث لم يعط نتائج دقيقة ؛ واتضح أن عددًا كبيرًا من الشقوق ذات الأبعاد المتساوية عن بعضها البعض ، تعطى نظامًا أكثر حدة وإتقانًا للهدبات . ويبين الشكل 12-24 ، مثلاً ، نمط التداخل الناظر لعشرين شقًا متوازيًا يسقط عليها ضوء أحادى اللون حيث يلاحظ مدى حدة الهدبات ويستخدم عدد كبير من الشقوق المتوازية ذات المسافات البينية المتساوية ،

لقياس الأطوال الموجية بدقة كبيرة . والنبيطة التى يتوفر لها هذا العدد تسمى **محزوز الحدود** وقد يحتوى محزوز نموذجى على 10,000 شقا متوازيًا ، يبعد كل منها عن الشق المجاور لها بمسافة $d = 10^{-4}$ cm . وسنقوم الآن بدراسة سلوك هذا المحزوز .





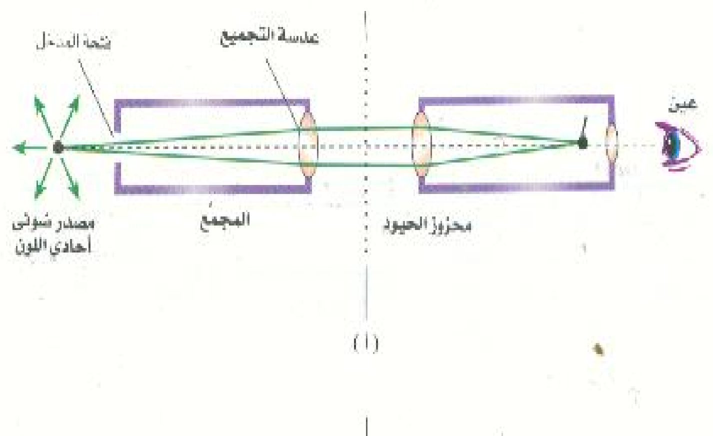
شكل 12-24:
نمط التداخل الخاص بضوء أحادى اللون والناتج عن شقوق (فتحات) متساوية التباعد عن بعضها البعض ويبلغ عددها عشرون شقا . يلاحظ مدى دقة هذه الهدبات مقارنة بتلك المبينة فى الشكل 6-24 والتى نتجت عن شقين فحسب (أو عن شق مزدوج) .

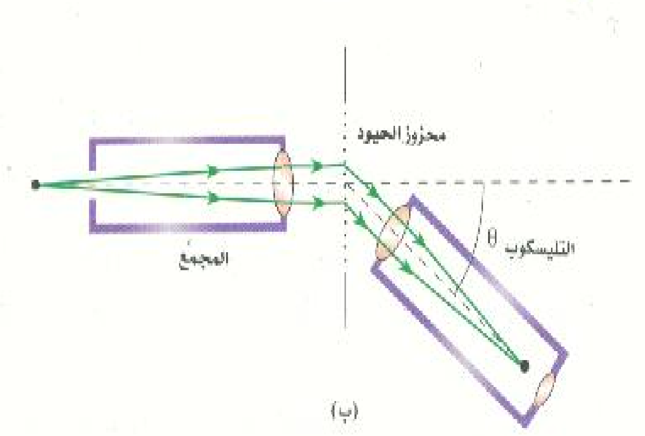
ويتم استخدام محزوز الحيود عادة بالأسلوب المبين فى الشكل 13-24 (أ) . دعنا نفترض الآن أننا نستعمل ضوءًا من مصدر أحادى اللون لإضاءة شق المدخل ، وحيث أن هذا الشق يقع عند بؤرة **عدسة التجميع*** فإن حزمة من الضوء المتوازى تخرج من هذه العدسة لكى تسقط متعامدة على المحزوز . وتقع شقوق المحزوز بحيث تتعامد على الصفحة كما فى الشكل 13-24 (أ) . ويمكننا مشاهدة الضوء النافذ من المحزوز بواسطة تلسيكوب صغير . وبغض النظر عن الطول الموجى المستخدم فى إضاءة المحزوز فإننا سنشاهد صورة حادة للشق عندما ننظر مباشرة إلى الشعاع .

افترض الآن أننا نحرك التليسكوب فى مستوى أفقى بزاوية θ مع الاتجاه المباشر ، كما هو مبين فى الشكل 13-24 (ب) . لن نرى أى ضوء على الإطلاق عند معظم قيم θ ، إلا إنه عند قيم محددة فإننا سنرى صورة حادة لفتحة المدخل . . وهذه الصور مكافئة للهدبات الساطعة المبينة فى الشكل 12-24 وأن كانت أكثر تحديدًا .

وإذا غيرنا الطول الموجى المستخدم فى الإضاءة فإننا نغير من ثم قيم θ التى تظهر عندها الضوء ، فإذا كانت الإضاءة تحتوى على أكثر من طول موجى منفرد فإن كل طول موجى سوف ينتج صورة لفتحة المدخل عند زاوية منفصلة عن تلك الناتجة بواسطة أطوال موجية أخرى . فالضوء الصادر من المصدر سيتم فصله إلى عدد من الصور الحادة والتى تنتمى كل منها لطول موجى منفرد من الأطوال الموجية الموجودة فى الضوء المسلط على المحزوز . وهذه الصور هى التى تسمى **خطوط الطيف** ، وهى المميزة للطيف المنبعث من المصدر . وبسبب هذه الإمكانية ، فإن الجهاز الذى يشبه ما يوضحه الرسم فى الشكل 13-24 يسمى **مطياف المحزوز** . سنقوم الآن بدراسة العلاقة بين الطول الموجى المستخدم فى إضاءة المحزوز والزوايا التى ترصد عندها صورة فتحة المدخل .

* **عدسة التجميع** هى عدسة لامة أو مجمِّعة تستخدم لإنتاج أشعة متوازية أو **مجمعة** . ويتم هذا بوضع العدسة على مسافة بعد بؤرى من مصدر ضوئى صغير . وكما درسنا فى الفصل الثالث والعشرين فإن الأشعة الساقطة التى تخرج من المصدر متفرقة ستمر من العدسة وهى موازية للمحور الرئيسى .



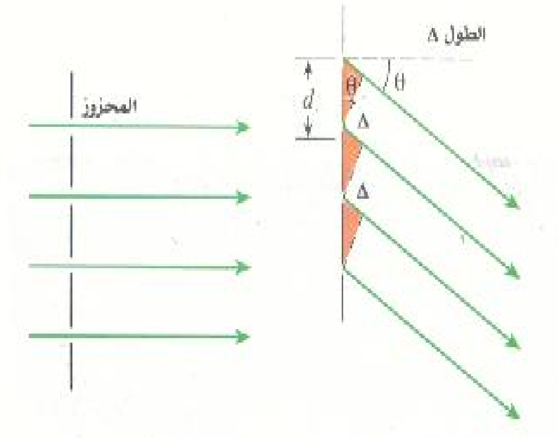


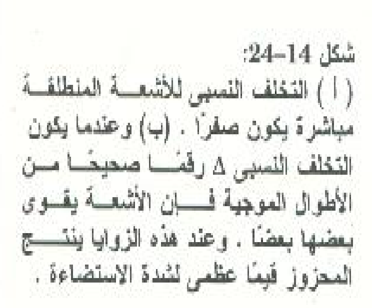
شكل 13-24:
(أ) رسم تخطيطي لمطياف المحزوز وهو واحد من أكثر التطبيقات شيوعاً بالنسبة لمحزوز الحيود . (ب) وعندما يدار التليسكوب في قوس دائرة مركزها محزوز الحيود ، فإن صورة الفتحة تتكون نتيجة تداخل بناء عندما يصنع التليسكوب زاوية مقدارها θ مع الحزمة غير المنحرفة . وتعتمد هذه الزاوية على الطول الموجي الساقط على المحزوز .

إن أول ما تجب معرفته هو أن كل شق (فتحة) ضيق في المحزوز سيعمل عمل مصدر للموجات الضوئية (مبدأ هيجنز) . عندما تكون $\theta = 0$ في الشكل 13-24 (ب) فسنرى الحزمة غير المنحرفة والمبينة في الشكل 14-24 (أ) . فإذا انتقلت الأشعة الصادرة من جميع الفتحات لنفس المسافة نحو التليسكوب فإنها تقوى بعضها البعض . ويكون هذا صحيحًا بالنسبة لأي طول موجي . وعلى ذلك ، يكون توجيه التليسكوب بحيث $\theta = 0$ يجعلنا نرى صورة فتحة المدخل التي تحتوي على جميع الأطوال الموجية في المصدر الضوئي . وتسمى هذه الصورة بأسماء مختلفة مثل : **القيمة العظمى المركزية** ، **القيمة العظمى ذات الرتبة الصفرية** ، **والصورة المركزية** .

افترض أنه عند زاوية معنية θ ، كالمبينة في الشكل 14-24 (ب) ، رأينا صورة مضيئة لفتحة المدخل ، وأشعة الضوء القادمة من كل فتحات المحزوز ، ستكون مرة أخرى متوازية مع بعضها البعض عند دخولها إلى التليسكوب ، ولكنها الآن لم تعد **موجهة** في الاتجاه غير المنحرف . ويتخلف كل شعاع عن الذي يجاوره أو يسبقه كما هو مبين ، بمسافة مقدارها Δ . ونعلم مما سبق أن قيم $\Delta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ .. إلخ تجعل الأشعة يقوى بعضها بعضًا . وعلى هذا يكون الشرط اللازم حتى يمكن رؤية الصورة هو $\Delta = m\lambda$ ، حيث m هو رقم صحيح .

إذا اعتبرنا أي مثلث ملون في الشكل 14-24 (ب) فسنجد أن $\sin\theta = \Delta/d$ حيث d هو المسافة بين فتحات المحزوز وتسمى **تباعد المحزوز** ولكي تتكون الصورة لابد أن يكون لدينا $\Delta = m\lambda$ ، أي أننا سنجد صورًا مضيئة لفتحة المدخل عندما تكون θ مساوية لقيم θ_m التي تعطى بالمعادلة :




شكل 24-14:
(أ) التخلف النسبي للأشعة المنطلقة مباشرة يكون صفرًا . (ب) وعندما يكون التخلف النسبي Δ رقمًا صحيحًا من الأطوال الموجية فإن الأشعة يقوى بعضها بعضًا . وعند هذه الزوايا ينتج المحزوز قيمًا عظمى لشدة الاستضاءة .

$$m\lambda = d \sin \theta_m \ , \quad m = 1, 2, 3, \ldots\ldots \qquad (24\text{–}4)$$

وهى معادلة المحزوز .

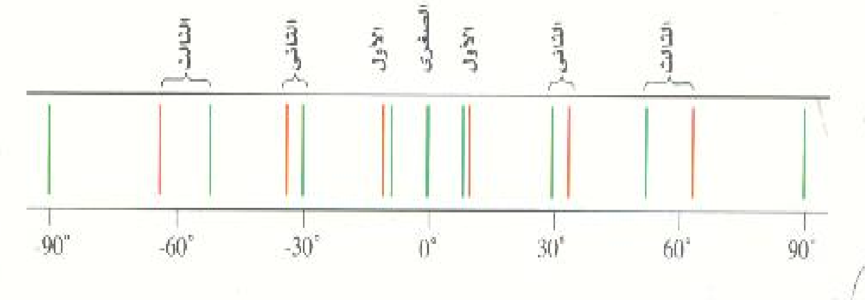
وسنفترض ـ من أجل استيعاب أفضل معادلة المحزوز ـ أن مصدر الضوء يحتوى على طولين موجبين فحسب وهما 500 nm و 600 nm . وسنفترض أيضًا أن $d = 2 \times 10^{-6}$ m فإذا عوضنا بهذه الأرقام فى المعادلة 4–24 لوجدنا مواقع الصور المدونة فى الجدول 1–24 وهذه الصور مبينة أيضًا فى الشكل 15–24 مقترنة مع الأسماء التى تطلق عليها . (وحيث أن خطوط الطيف من الرتبة الرابعة تحدث عند $\theta = 90°$ أو أكبر من هذا فإنها لا يمكن أن ترى) . يلاحظ أن الخطوط تظهر على جانبى القيمة العظمى المركزية ، كما يلاحظ أن التباعد بين كل خطين يتزايد مع ازدياد قيمة θ ، ومن الوسائل المتبعة لجعل مواقع صور الرتبة الأولى تحدث عند زوايا أكبر ، هى أن نجعل d أصغر ما يمكن . كما تشير بذلك المعادلة 4–24 . فإذا فعلنا ذلك لأمكننا فصل الخطوط المتكدسة إلى بعضها البعض .

جدول 1–24:
مواقع خطوط الطيف*

λ(nm)	m	θ_m درجة
600 و 500	0	0
500	1	14.5
600	1	17.5
500	2	30.0
600	2	36.9
500	3	48.6
600	3	64.2
500	4	90
600	4	مفقود

* افترض $d = 2\mu$m

وحيث أننا نستطيع قياس الزاوية θ_m بدقة كبيرة ـ وهى الزاوية تحدث عندها القيمة العظمى من الرتبة m ـ فإنه يصبح من الضرورة معرفة تباعد المحزوز d فحسب حتى نتمكن من تعيين λ بدقة . فإذا استخدم الضوء الأصفر المنبعث من مصباح قوس الصوديوم ، مثلاً ، ولو مع مطياف بسيط ، فلم يكون من الصعب مشاهدة صورة **فتحتين** (أو خطين) للضوء الأصفر عند موضع كل رتبة ويكون هذان الخطان متقاربين جدًا وطولاهما الموجيين هما 589.0 nm و 589.6 nm . إن الحقيقة المحضة وهى أننا قادرون على رؤية هذين الخطين على هيئة صورتين محددتين إنما توفر لنا مقياسًا لدى دقة مثل هذا الجهاز .



شكل 15–24:
يحتوى كل من الرتب الأولى والثانية والثالثة على خطين أحدهما للضوء 500 nm والثانى للضوء 600 nm .

مثال 3-24 :

محزوز حيود به 1.0000×10^4 خط في كل سنتيمتر ، فعند أية زوايا يظهر خط الصوديوم الذي طوله الموجي 589.0 nm ؟ ما هي الدقة المطلوبة حتى يمكنك قياس الزوايا التي تتيح رؤية التباعد بين هذا الخط وخط الصوديوم الآخر 589.6 nm ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي معادلة الزاوية المناظرة لصورة من الرتبة الأولى ؟

الإجابة : $\sin\theta_1 = \frac{\lambda}{d} = \frac{0.5890 \times 10^{-6}\ \text{m}}{d}$

سؤال : ما هو تباعد المحزوز d ؟

الإجابة : $d = \frac{1}{1.0000 \times 10^4\ \text{lines/cm}} = 1.0000 \times 10^{-6}\ \text{m}$

سؤال : ما الذي يحدد إمكانية ظهور خط من الرتبة الثانية من عدمه ؟

الإجابة : إن المقدار $\sin\theta_m$ لابد أن يظل دائمًا أقل من الواحد ، ولهذا فالشرط اللازم لظهور خط من الرتبة m هو $m\lambda/d < 1$.

سؤال : ما هي الزاوية التي سيظهر عندها الخط 589.6 nm ؟

الإجابة : سيظهر عند زاوية تحقق المعادلة $\sin\theta_1 = \frac{(0.5896 \times 10^{-6}\ \text{m})}{d}$

الحل والمناقشة : تحدث الخطوط من الرتبة الأول عند الزاويتين $\sin^{-1} 0.5980$ و $\sin^{-1} 0.5986$. وهاتان الزاويتان هما :

$$\theta_1 = 36.09^\circ \quad \text{و} \quad 36.13^\circ$$

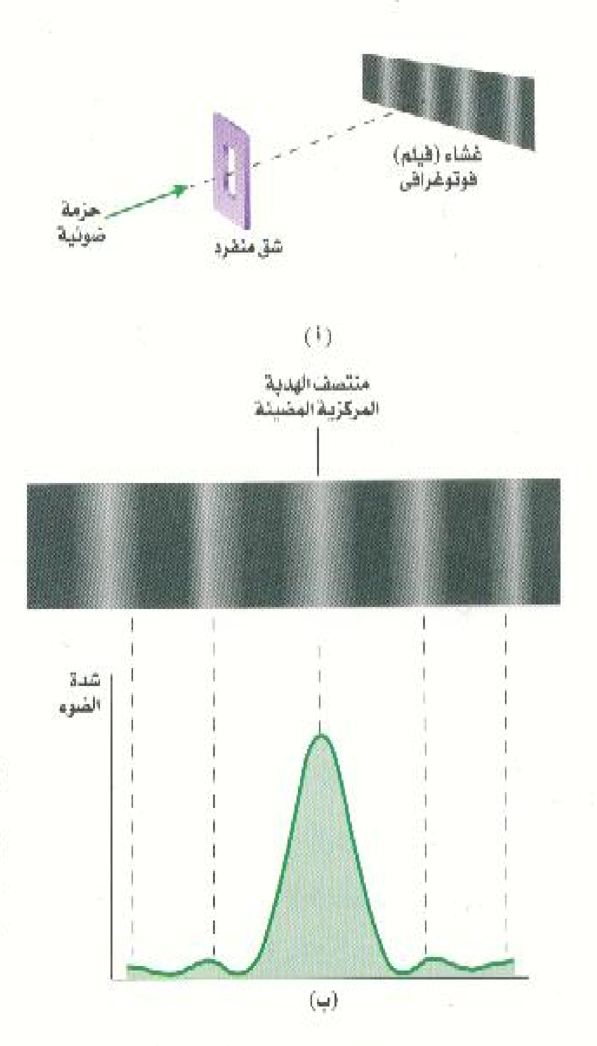
ولكي تتمكن من فصل هذين الخطين ستكون في حاجة لقياس زوايا إلى أقرب 0.01° .

أما خطوط الرتبة الثانية فتستلزم أن تكون $\sin\theta_2 = \sin\theta_1$. (لاحظ أن هذا لا يعني أن الزوايا تتضاعف !) . وفي كلتا الحالتين سيكون هذا الرقم أكبر من الواحد الصحيح ومن ثم لن تظهر خطوط الرتبة الثانية .

7–24 الحيود بواسطة شق منفرد (فتحة منفردة)

لقد اعتبرنا ـ حتى الآن ـ أن عرض الشق مهمل إذا قورن بالطول الموجي للضوء المستخدم فإذا نظرت إلى الشكل 1–24 ، لرأيت أن الحيود بالنسبة للأطوال الموجية الأطول يكون أكبر من نظيره للأطوال الموجية الأقصر . ويعني هذا أن الحيود يعتمد على حجم الطول الموجي بالنسبة لعرض الفتحة . ونود الآن أن ندرس أسباب هذه الظاهرة وأن نصف بطريقة أكثر شمولاً كيف يقوم الشق المنفرد بإحداث حيود للضوء . وسوف تشكل النتيجة التي نحصل عليها أهمية أساسية ، كما أنها سوف تضع قيودًا على مقدرتنا على القيام بقياسات .

ولكى نشاهد ظاهرة حيود الموجات الضوئية فإننا نستطيع إرسال الضوء عبر شق منفرد ثم نسجل الضوء النافذ على غشاء فوتوغرافى ، كما هو موضح فى الشكل 16-24 . والهدبة المركزية المضيئة أعرض بكثير من الشق نفسه . وعلاوة على ذلك ، فإن الهدبات المضيئة التى تفصل بينها هدبات مظلمة تظهر على جانبى الصورة المركزية (الوسطى) . ولابد أن تنتج هذه الهدبات المضيئة من التداخل وسنقوم الآن بفحص ما ينطوى عليه هذا الموقف .

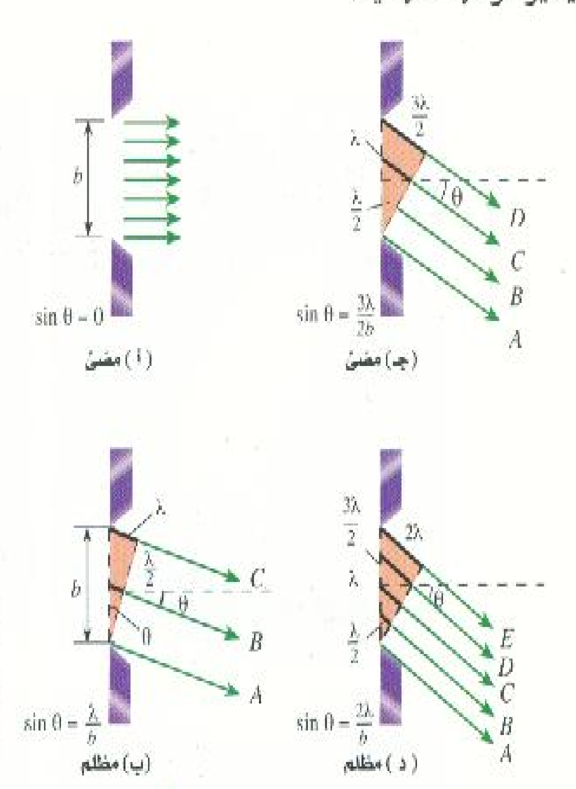


شكل 16-24:
(أ) نمط تداخل من شق منفرد (الأبعاد ليست واقعية) . (ب) المنطقة المضيئة الوسطى أكثر شدة من الهدبات عند الرتب الأعلى كما يوضح الرسم البيانى .

اعتبر قمة موجية ترتطم بالفتحة . . إن كل نقطة ضئيلة من نقط تلك القمة ستعمل - حسب مبدأ هيجنز - عمل مصدر لموجات جديدة . وهكذا تنبعث أشعة ضوئية من كل النقط على امتداد القمة ، فتنتشر بعض الأشعة إلى الأمام مباشرة بينما تميل الأخرى بزاوية مقدارها θ على الاتجاه الأمامى . وتكون الأشعة الضوئية التى تنتقل مباشرة عبر الفتحة - كما يبين ذلك الشكل 17-24 (أ) - متفقة كلها فى الطور مع بعضها البعض . وهذا هو ما يجعل موضع الاختراق المباشر أكثر سطوعًا ويؤدى إلى ظهور الهدبة المركزية المضيئة فى الشكل 16-24 . إلا إنه عند وجود زاوية مقدارها θ مع الحزمة التى تنفذ مباشرة للأمام ، فإن الأشعة المنبعثة من أجزاء مختلفة للفتحة سوف تنتقل مسافات مختلفة إلى أن تصل إلى الغشاء (الفيلم) . ويوضح الشكل 17-24 (ب) ؛ (جـ) ؛ (د)

أكثر تلك المواقف أهمية* .

إن الشعاع B المنطلق من منتصف الفتحة : يتخلف على الشعاع A بمقدار نصف طول موجي (الجزء ب من الشكل ، ويؤدى ذلك إلى أن يلغى الشعاعان أحدهما الآخر . على أن هذا ليس كل شيء . لأننا سنرى أن الأشعة التي ستغادر الفتحة من مواقع فوق كل من A و B ، هي الأخرى يلغي بعضها بعضًا وذلك لأن فرق المسار فيما بينها هو $\lambda/2$. والواقع أن كل شعاع ينطلق من النصف السفلي للفتحة ، سيناظره شعاع ينطلق من النصف العلوي ليلغى كل منهما الآخر . وعلى ذلك ، فعند هذه الزاوية θ ، لن يصل ضوء إلى الغشاء من الفتحة ونشاهد هدبة مظلمة . وكما هو واضح من الشكل فإن هذا الموقف يتحقق عندما $\sin\theta = \lambda/b$ حيث b هو عرض الشق . ويلاحظ أنه لو كان b يساوي الطول الموجي للضوء ، فإن الهدبة المظلمة سوف تظهر عند $\theta = 90°$. وبعبارة أخرى ، **لو أخذ عرض الفتحة في التناقص حتى صار مساويًا λ فإن صورة الفتحة ستأخذ في الانتشار حتى يصير عرضها لانهائيا .**



شكل 17–24:
عند تحليل الشق المنفرد نوعيًا فإننا نقسم الفتحة أو الشق إلى أجزاء تختلف الأشعة المنبعثة منها فيما بينها بمقدار $\lambda/2$ فى طول المسار . لماذا ؟

ولو أن b كان أكبر بكثير من λ ، كما في الشكل 17–24 فإن هدبة مضيئة جانبية ستظهر عند الزاوية θ المبينة فى الجزء (جـ) . وفى هذه الحالة فإن الأشعة القادمة من الثلث السفلي للشق سيقوم بإلغاء الأشعة القادمة من الثلث الأوسط ، في حين يبقى للثلث العلوي بدون إلغاء . ويتحقق الظلام مرة أخرى عند زوايا أكبر كالموضحة في الجزء (د) ، حيث يمكن اعتبار أن الشق قد انقسم إلى أربعة أرباع . فالربع السفلي

* لو كانت كل الأشعة متوازية لما أمكن أن تتلاقى ، ونتيجة لذلك لما حدث تداخل بينها وأمامنا هنا أحد موقفين : (1) أن تقوم عدسة بتجميع الأشعة المتوازية في بؤرة أو (2) أن يقوم قدر طفيف من عدم التوازي يجعل الأشعة تلتقي فى نقطة .

سيلغيه الربع الذى يعلوه مباشرة . وبالمثل يلغى الربعان العلويان كل منهما الآخر . ولذلك نشاهد الظلام الحادث عند هذه الزاوية .

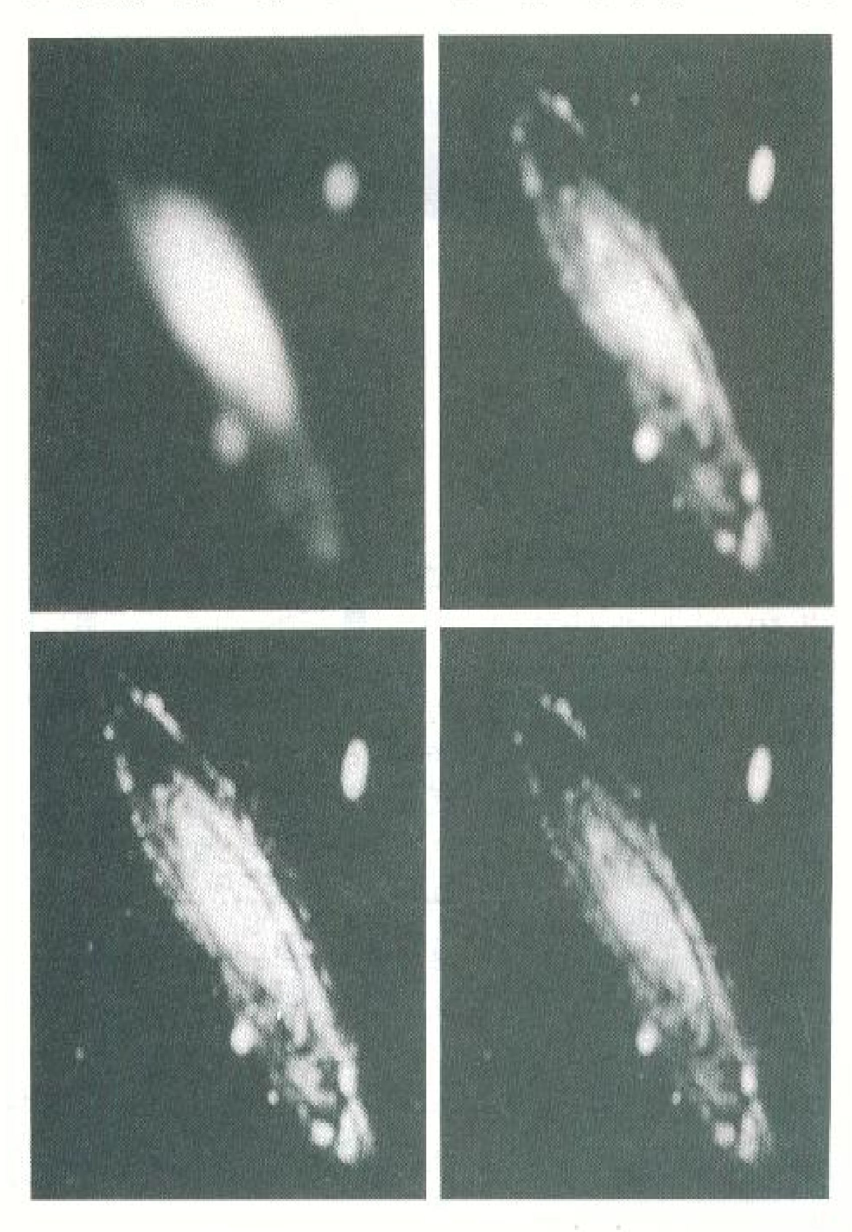
وأكثر السمات أهمية في نمط الشق المنفرد ـ والمتعلق بأغراضنا ـ هو موقع القيمة الدنيا التي تلي القيمة العظمى المركزية . فإذا رمزنا للزاوية الواقعة بين القيمة العظمى المركزية وأول قيمة دنيا ، بالرمز θ_c فإن :

$$\sin\theta_c = \frac{\lambda}{p} \qquad (24\text{-}5)$$

وسوف نعود إلى استخدام هذه المعادلة في القسم التالى .

24-8 الحيود وحدود التحليل

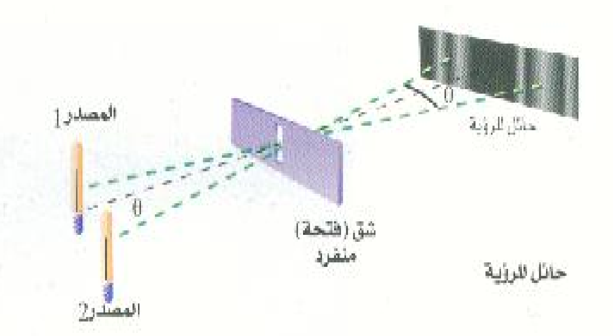
من أهم تبعات الحيود أنه يحد من قدرتنا على ملاحظة التفاصيل الدقيقة جدًا . ويمكننا إدراك هذه الصعوبة إذا رجعنا إلى الشكل 18-24 : حيث نرى مصدرين ضوئيين يبعثان



التقطت صور المجرة هذه عندما كانت فتحة التلسكوب آخذة فى الكبر بالتدريج مما يبين كيف يتحسن تحليل الصورة وتفاصيلها مع ازدياد الفتحة .

الضوء عبر شق (فتحة) لينفذ إلى حائل للرؤية . وعندما تكون الفتحة صغيرة بما يكفي فإن الصور التي تظهر على الحائل ستكون مصحوبة بهدبات حيود ملحوظة كما هـو مبين . وهذه الـهدبات نتيجة لأن الضوء قد مر عبر الشق الذي عرضه b .

يمكنك أن تبدأ في استيعاب الصعوبات التي تشكلـها هذه الـهدبات إذا تناولت المثـال التقريبي التالي والذي سنعالجه لأبعد من هذا فيما بعد . سنعتبر أن إنسان العين سـيناظر الفتحة تقريبًا ، وأن الخطين المرسومين على جسم ما تنظر إليه العـين ، يناظران مصدريـن ضوئيين في الشكل 18–24 . وستمثل شبكية العين الحائل الـذي تسـقط عليـه الصـور . وحيث أن الصور الواقعة على الشبكية ستكون مشوشة بسـبب ظاهرة الحيـود المصاحبـة لوجود الفتحة (إنسان العين) ، فإن العين ستُمنع من رؤيـة التفـاصيل الدقيقـة للجسـم الذي تنظر إليه .



شكل 18–24:
لقد تم تحليل المصدرين جيدًا فوق الحـائل لأن نمطي التداخل المنـاظرين لـهما لـم يتراكبا بشكل كبير .

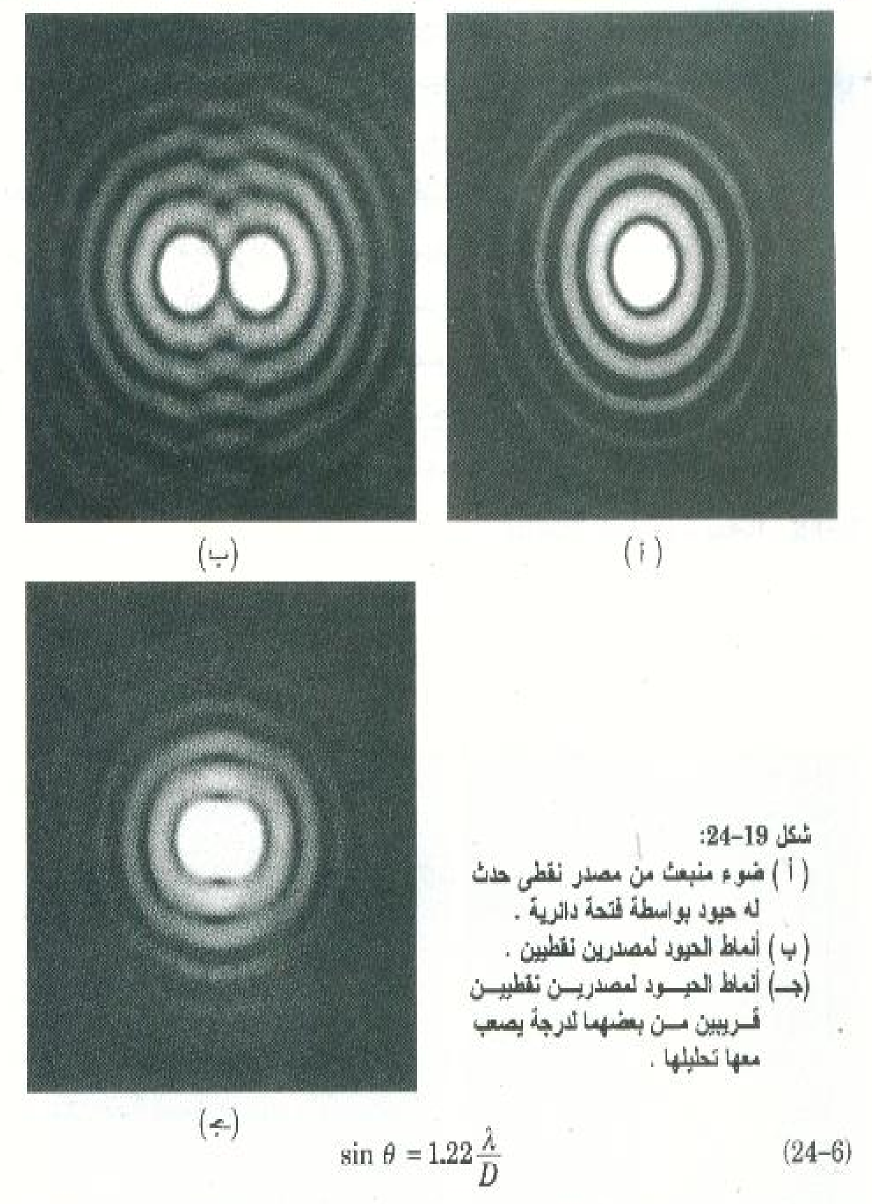
إذا عدنا سـريعًا إلى الموقف المبين في الشكل 18–24 ، فسنرى أن صورتـي المصدريـن على الحائل ستكونان منفصلتين طالما لم تكن الزاويـة θ صغـيرة جـدًا . وتنشـأ الصعوبـة عندما تكون θ من الصغر بحيث يتراكب نمطا التداخل بشكل مؤثر ؛ وعندئـذ لـن يعـود ممكنًا رؤية المصدرين منفصلين (أي لن يمكن **تحليلـهما**) حيث يكونان قريبين من بعضهما بحيث تقع القيمة العظمى المركزية لأحد النمطين على القيمة الدنيا للنمط الآخر . وفي هذا الموقف ، حيث **يتحقق الحد الأدنى للتحليل** فإن $\theta = \theta_c$ ، حيث θ_c قد سبق تعريفها بالمعادلة 5–24 . **أي أننا لا نسـتطيع تحليـل المصدريـن إلا إذا كـان الانفـراج الزاوي بينهما θ أكبر من θ_c** . وكما نتوقع فإنه كلما كان عرض الفتحة b صغيرًا ، كلما كان لابد من تباعد الجسمين إذا أردنا تحليلـهما لأن نمطي التداخل يصيران أعرض كلما صغر عرض الفتحة .

على الرغم من أن مناقشاتنا انصبت على حيود مصادر الضوء ، الناشئ عـن فتحـات (أو شقوق) ، إلا أن ظواهر مشابهة قـد تحـدث عندما نسـتبدل بـالشق فجوة أو فتحـة دائريـة صغيرة . وتشمل أمثلة تلك الفتحات ، إنسان العين وقزحية عدسة آلة التصوير (الكاميرا) .

يبين الشكل 19–24 (أ) نمط الحيود الناشئ عن فتحة دائرية يضيؤها مصدر نقطي للضوء . ويعطى القطر الزاوي* للقيمة العظمى المركزية بالمعادلة :

---

* يشير مصطلح **القطر الزاوي** إلى الزاوية التي تصنعها القيمة العظمى المركزية لنمط الحيود عند مركـز الفتحة . وبعبارة أخرى ، هي الزاوية التي تصنعها الخطوط المرسومة مـن مركز الفتحة إلى نقط تقع عند النهايات المقابلة لقطر القيمة العظمى المركزية .



شكل 19-24:
(أ) ضوء منبعث من مصدر نقطى حدث له حيود بواسطة فتحة دائرية .
(ب) أنماط الحيود لمصدرين نقطيين .
(جـ) أنماط الحيـــود لمصدريـــن نقطييـــن قـــريبين مـــن بعضهما لدرجة يصعب معها تحليلها .

$$\sin\theta = 1.22\frac{\lambda}{D} \qquad (24\text{-}6)$$

حيث D هو قطر الفتحة . لاحظ التشابه بين هذه المعادلة والمعادلة 5-24 بالنسبة لفتحة عرضها d .

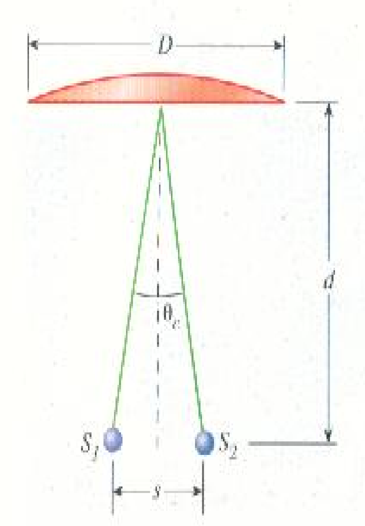
عندما يقترب مصدران نقطيان من بعضهما البعض فإن نمطـى الحيـود النـاتجين عـن الضوء المار عبر الفتحة سيأخذان فى التراكب حتى يندمجا فى النهايـة فـى نمـط واحـد كما فى الشكل 19-24 (ب) و (جـ) وحد تحليل المصدرين هو أن الانفـراج الـزاوى بـين قيمتيهما العظميين المركزيتين لابد وأن يكون **على الأقل** مساويًا للعرض الزاوى لتلك القيم العظمى . وعلى ذلك يكون لدينا الشرط التالى :

تعطى الزاوية θ_c التى تحد من تحليل (تفريق) مصدرين نقطيين مرصوديـن مـن خـلال فتحة قطرها D من المعادلة :

$$\sin\theta_c = 1.22\frac{\lambda}{D} \qquad (24\text{-}7)$$

دعنا الآن نفحص نوع الحدود التى يفرضها تاثير الحيود على مقدرتنا على رؤية الأشياء بواسطة ميكروسكوب (مجهر) .

يوضح الشكل 20-24 عدسة ميكروسكوب واثنتين من تفاصيل جسم يفحص تحت الميكروسكوب يفصل بينهما مسافة مقدارها s ، أصغر بكثير عما هو مبين بالرسم . وقطر العدسة D وتبعد التفاصيل عن العدسة مسافة مقدارها d . إلى أى مدى يمكن أن تتقارب التفاصيل ومع ذلك يمكن تحليلها ؟



شكل 20-24:
يمكن التفريق بين اثنتين من تفاصيل جسم ما s_1 و s_2 عندما تكون $\theta = \theta_c$.

تنص المعادلة 7-24 على أن التفاصيل يمكن تحليلها إذا كانت الزاوية θ_c التى يصنعها هى $\sin^{-1}(1.22\,\lambda/D)$. ونرى من الشكل 20-24 أن

$$\sin\frac{\theta_c}{2} = \frac{s/2}{\sqrt{d^2+(s/2)^2}} \approx \frac{s}{2d}$$

لأن s أصغر بكثير فى الواقع من d .

وبالنسبة للزوايا الصغيرة ، فإن الزاوية مقاسة بالتقدير الدائرى مساوية لجيبها وحيث أن θ_c صغيرة جدًا فى العادة ، فإن بإمكاننا عندئذ أن نستبدل بالمقدار $\sin\,\theta_c$ الزاوية θ_c بالتقدير الدائرى ونحصل على :

$$\theta_c = \frac{s}{d}$$

وبإجراء نفس التقريب للمعادلة 7-24 ، فإن :

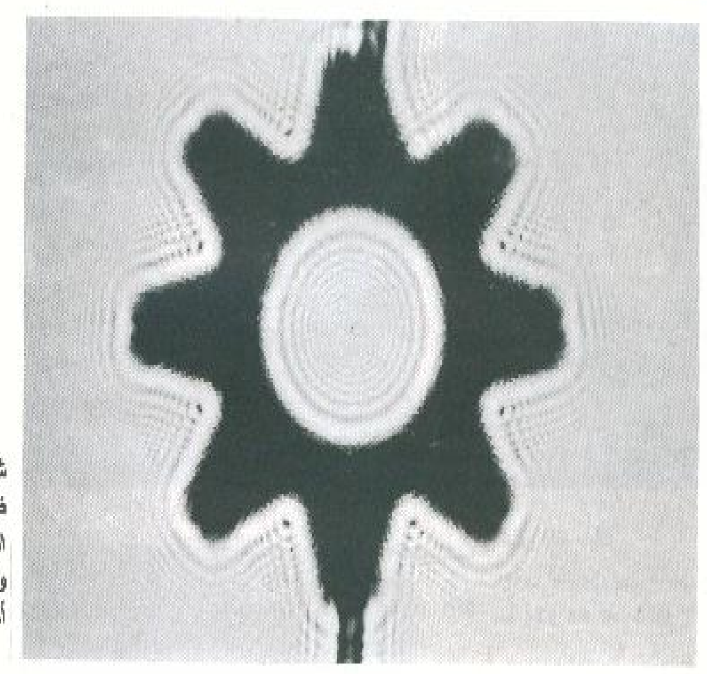
$$\theta_c = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

وبمساواة هاتين المعادلتين ، نحصل بسهولة على :

$$s = 1.22\left(\frac{d}{D}\right)\lambda$$

إذا رجعنا إلى الشكل 20-24 فسنجد أن المقدار (d/D) هو النسبة بين بعد الجسم وقطر العدسة . وهذه النسبة تقترب من الواحد الصحيح فى جميع الاستخدامات العادية للميكروسكوبات ويمكننا ـ نتيجة لذلك ـ وكتقريب أولى أن نعتبر $s \approx \lambda$. وبعبارة أخرى ، **فإن أصغر التفاصيل التى يمكن رؤيتها تحت ميكروسكوب هى التى لها نفس حجم الطول الموجى المستخدم تقريبًا** . وهذا قيد أساسى مفروض بالحيود ولا يمكن تجاوزه باستخدام عدسات مثالية الجودة أو ميكروسكوب عبقرى التصميم .

وهكذا نرى أن ظواهر الحيود تجعل الصور مشوشة ، والشكل 21-24 يصور مثالاً آخر على هذه الحقيقة ، حيث نجد أن ظل الفلكة المبين بالشكل قد أحيط بهدبات الحيود ، بل وقد يصبح الأمر أسوأ بالنسبة لأجسام أصغر من ذلك . وفى حالة ما إذا كان حجم الجسم مقاربًا للطول الموجى للضوء المستخدم ، فإن تفاصيل ذلك الجسم ستطمس تمامًا نتيجة الحيود ، وعلينا عندئذ أن نستنتج **أنه من المستحيل الحصول على صور لأجسام تقترب تفاصيلها فى الحجم من الطول الموجى للأشعة المستخدمة** .



شكل 21-24:
ظل فلكة على شكل نجمة ، وترى أشرطة الحيود داخل الثقب وحول الحواف الخارجية وتظهر الأجسام الأصغر من ذلك تشوشًا أكبر بسبب تنامي تأثيرات الحيود .

مثال 4-24

يبلغ قطر فتحة تليسكوب « هيل » على جبل بالومار بكاليفورنيا 5.0 m . ما هي أصغر زاوية بين نجمين يمكن التفريق بينهما بواسطة هذا التليسكوب ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد قيمة أصغر زاوية يمكن تحليلها ؟

الإجابة : إنه الطول الموجى للضوء المستخدم وقطر الفتحة التى يمر منها الضوء (المعادلة 7-24) .

سؤال : أى طول موجى على أن استخدم ؟

الإجابة : لقد كنا نتناول الضوء المرئى الذى يقع فى مدى ضيق من الأطوال الموجية . ولذا عليك استخدام طول موجى بالقرب من منتصف الطيف المرئى ، مثل 550 nm .

الحل والمناقشة : من المعادلة 7-24 :

$$\sin \theta_c = \frac{1.22(550 \times 10^{-9}\ \text{m})}{5.0\ \text{m}} = 0.134 \times 10^{-6}$$

وكما ذكرنا منذ قليل ، فإنه بالنسبة لقيم صغيرة للزاوية θ (مقاسة بالتقدير الدائرى) فإن $\sin\theta = \theta$. ولا شك أن القيمة التى حسبناها تصنف بسهولة على أنها صغيرة جدًا . ومن ثم :

$$\theta_c = 0.134 \times 10^{-6}\ \text{rad} = 7.68 \times 10^{-6}\ \text{deg.}$$

ولبيان مدى صغر هذه الزاوية ، فإن تليسكوب « هيل » يستطيع - نظريًا - أن يحلل جسمًا حجمه 1 in يبعد ما يزيد على 100 mi !

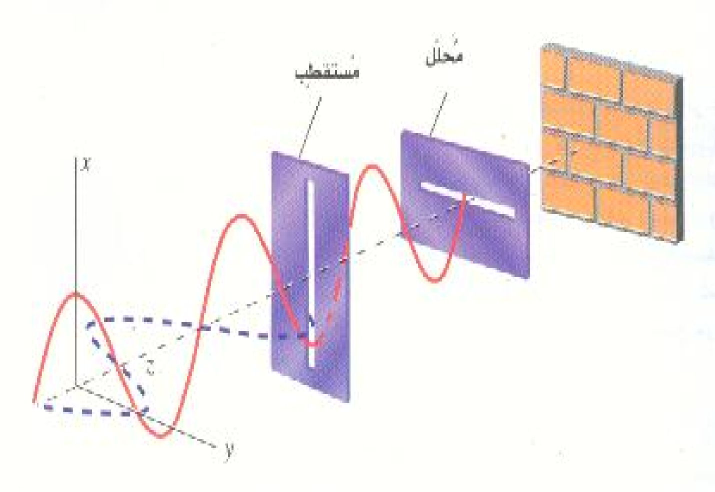
24-9 الضوء المستقطب

تظهر كل من الموجات المستعرضة والطولية ظواهر تداخل وحيود ، على أن هناك ظاهرة واحدة لا تتجلى إلا مع الموجات المستعرضة وهى : **الاستقطاب** . ويمكننا تصوير الاستقطاب إذا تخيلنا الموجات المستعرضة التى تنشأ فى حبل ؛ فقد ينشأ العديد من الموجات التى تهتز فى نفس الوقت فى الحبل وتتخذ اتجاهات متباينة ، بمعنى أن يتحرك بعضها فى المستوى الأفقى والبعض الآخر فى المستوى الرأسى بينما تبقى بعض الموجات التى لها مركبات فى كل من المستويين . ومثل هذه الموجات المختلطة يطلق عليها موجات **غير مستقطبة** . افترض الآن أن الحبل يمر من خلال شق رأسى ، سنسميه مُستقطِب كما هو موضح فى الشكل 22-24 . وسوف يوقف هذا الشق جميع المركبات الأفقية للموجات ولن يسمح سوى للحركة الموجية الرأسية بالمرور من خلاله . أى أن الموجة التى تتجاوز هذا المستقطب ستكون ذبذباتها فى مستوى واحد فقط ولذا فهى تسمى **موجة مستقطبة استوائيًا** . ويمكن فحص هذا الاستقطاب بإمرار الموجة المستقطبة خلال شق ثان بينه وبين الشق الأول زاوية مقدارها 90° . وسوف يقوم الشق الثانى ـ وسنسميه المُحَلِّل ـ بصد الموجة كما يبين الشكل 22-24 ؛ وبذلك لن تكتشف أية طاقة موجية فيما وراءه .

وعلى الجانب الآخر ، فالموجات الطولية مثل موجات الصوت تتكون من جزيئات تتذبذب فى نفس اتجاه انتشار الموجة ولذلك لا يؤثر الشق فى الحركات الطولية . أى أن الموجة الطولية غير قابلة للاستقطاب . ولإثبات أن موجة ما مستعرضة فكل ما نحتاجه هو بيان أنها قابلة للاستقطاب .



تظهر الإجهادات الداخلية فى مادة شفافة باستخدام الضوء المستقطب ؛ حيث يكون الإجهاد أكبر ما يمكن فى المناطق التى يتغير فيها اللون أسرع من غيرها .



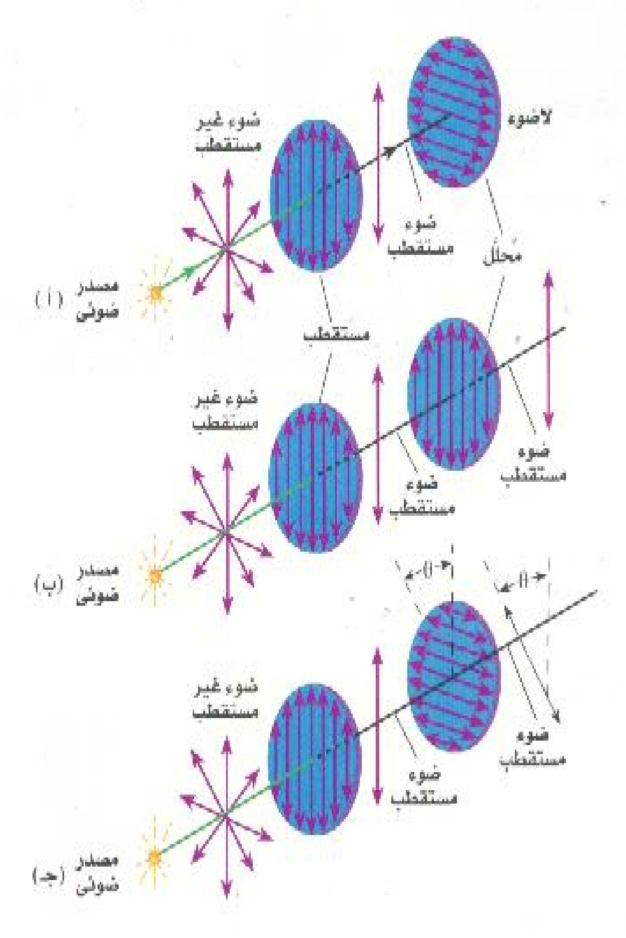
شكل 22-24:
الاستقطاب المشاهد فى الموجات الحادثة فى حبل مشدود شبيه باستقطاب الضوء .

هناك عدد من الوسائل التى يمكن بواسطتها استقطاب الضوء ، واثنتان من تلك الوسائل تتمان إما بالانعكاس وسنناقشها لاحقًا فى هذا القسم ، والأخرى بجعل الضوء يمر عبر مادة مستقطبة . وهذه الوسيلة شبيهة جدًا بالتى يقوم بها الشق باستقطاب موجة فى حبل . ومثل تلك المادة المستقطبة يصنع من غشاء شفاف به بلورات إبرية الشكل من مادة يودوكبريتات الكينين* والتى ترتب فى اتجاه واحد معين . وتتمتع هذه

* تعرف هذه الأغشية تجاريًا باسم « بولارويد » وقد اخترعها ادوين . هـ . لاند عام 1934 .

البلورات بخاصية السماح للمجال الكهربى بالمرور عبرها فى الاتجاه المتعامد مع طول البلورات فقط . ولذلك فإن الضوء غير المستقطب سوف يصبح مستقطبًا استوائيًا بعد مروره عبر تلك المادة . ويمكن بيان ذلك عند إمرار هذا الضوء عبر لوح مستقطب ثان تتجه بلوراته بزاوية مقدارها $90°$ بالنسبة لبلورات اللوح الأول . وهذا من شأنه أن يصد جميع الضوء المتبقى (وهو يفعل ذلك فعلاً) .

ويبين الشكل 23–24 تفاصيل هذه الظاهرة ؛ ففى الجزء (أ) يسقط ضوء غير مستقطب على المستقطب الأول الذى يسمح للضوء المستقطب رأسيًا فقط أن يمر ، وتبين الأسهم الأرجوانية **محور النفاذ** فى المستقطب وهو متعامد مع بلورات الأيودوكيريتات . وعندما يكون محور النفاذ فى المستقطب الثانى ـ أو المحلل ـ متجها بزاوية مقدارها $90°$ مع المستقطب الأول (الشكل 23–24 (أ)) فإن كل الضوء يُصد ويمنع من المرور .



شكل 23–24:
يصبح الضوء مستقطبًا استوائيًا إذا مر عبر مستقطب . ويمر كل الضوء أو بعضه أو لا شىء منه على الإطلاق عبر المحلل ، اعتمادًا على اتجاه محورى النفاذ النسبى . وتشير الأسهم المرسومة على اللوحين المستقطبين إلى اتجاهات مركبات متجهات المجال الكهربى المستعرضة والتى يسمح بمرورها كل لوح .

والمحلل فى الجزء (ب) متجه فى نفس اتجاه المستقطب الأول وبذلك يسمح لكل الضوء المستقطب رأسى بالمرور . أما إذا كان محور النفاذ بالمحلل مائلاً بزاوية مقدارها θ على محور المستقطب ، كما فى (جـ) فإن الضوء المستقطب فى مستوى محور المحلل هو الذى سينفذ .

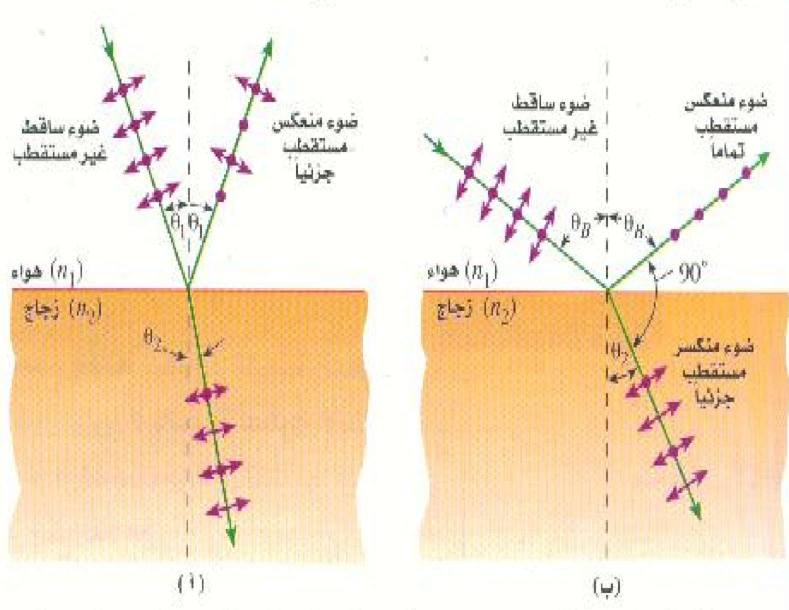
والمجال الكهربى فى الضوء غير المستقطب يتجه فى جميع الاتجاهات بالتساوى عموديًا على اتجاه انتشار الضوء . وعند استعمال مستقطب منفرد يسمح لمستوى واحد من التذبذب بالنفاذ ، فإن شدة الضوء النافذ تنخفض إلى نصف قيمتها التى فى الضوء الساقط غير المستقطب . وعندما يكون محور النقل بالمحلل مائلاً بزاوية مقدارها θ بالنسبة للمجال الكهربى للضوء الساقط على المحلل ، فإن المركبة $E \cos \theta$ للمجال هى

فقط التي سيسمح لها بالنفاذ . وحيث أن شدة الضوء تتناسب مع مربع سعة المجال ، فإنه يتضح أن الشدة النافذة من المحلل كما في الجزء (جـ) هي :

$$I_{\text{transmitted}} = I_{\text{incident}} \cos^2 \theta \qquad (24\text{-}8)$$

ومن التطبيقات الشائعة للمبادئ المستخدمة في صناعة أغشية البولارويد استعمالها في بعض النظارات الشمسية ، فإلى جانب أنها ملونة لخفض نفاذ الضوء ، فإنها مصممة بحيث تكون محاور النفاذ بالأغشية رأسية عندما تلبس النظارة . وتقلل مثل تلك النظارات من « الوهج » لأن الضوء إذ ينعكس من أسطحها المستوية ، يصبح مستقطبًا جزيئًا في اتجاه يوازي السطح العاكس . وأسطح المياه والطرق تقوم بدور الأسطح العاكسة ولذلك تتمتع النظارات المستقطبة بشعبية خاصة عند من يمارسون الصيد أو يقضون فترات طويلة في القيادة .

تعتمد درجة استقطاب الضوء المنعكس على زاوية سقوط الضوء على السطح العاكس ومعامل انكسار المادة العاكسة . وهناك زاوية سقوط واحدة خاصة تسمى **زاوية بروستر** (θ_B) التي يصبح فيها الضوء المنعكس مستقطبًا بنسبة مائة في المائة . ويحدث هذا عندما يتعامد اتجاه الضوء المنعكس على اتجاه الضوء المنكسر داخل السطح . والشكل 24-24 يصور هذا الموقف في حالة الحد الفاصل بين الهواء والزجاج .



شكل 24-24: (أ) استقطاب جزئي لضوء غير مستقطب أصلاً ، بواسطة الانعكاس من على سطح لوح زجاجي . (ب) استقطاب تام للضوء بواسطة الانعكاس من على لوح عند زاوية بروستر θ_B ، حيث $\tan \theta_B = n_1/n_2$ تتعامد – هنا – الموجات المنعكسة والمنكسرة ، وتكون كل متجهات المجال الكهربي في الضوء المنعكس موازية لسطح اللوح الزجاجي .

نستطيع الآن أن نطبق قانون « سنل » لنتعرف على كيفية اعتماد θ_B على المواد المستخدمة ، بالرجوع إلى الشكل 24-24 (ب) ، نجد أن

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_2$$

وباستعمال بعض المتطابقات من حساب المثلثات (عليك التحقق من هذه العلاقات إذا بدا أنها غير مألوفة لديك) . ونجد أن :

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin (90 - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

إذا قسمنا أحد طرفي المعادلة على الطرف الآخر ، وتذكرنا أن $\tan \theta = \dfrac{(\sin \theta)}{(\cos \theta)}$ ،

فإننا نصل إلى معادلة بسيطة لزاوية « بروستر » :

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = n \qquad \text{أو} \qquad \theta_B = \tan^{-1} n \qquad (24\text{-}9)$$

وكما هو الحال في جميع تطبيقات قانون سنل ، فإن θ_B تقاس بالنسبة للعمود المقام على السطح العاكس . والمقدار n في المعادلة (9–24) هو معامل انكسار الوسط الكاسر للضوء بالنسبة للوسط الذي يسقط فيه الضوء . ويلاحظ من الشكل 24–24 أن الضوء المنعكس يكون مستقطبًا بحيث يتوازى مجاله الكهربي مع السطح ، كما يلاحظ أن الشعاع المنكسر مستقطب جزئيًا .

مثال 5-24

ما هي الزاوية التي ينعكس بها الضوء الساقط من على سطح بحيرة بحيث يصبح مستقطبًا تمامًا ؟ وإذا كنت ترتدي نظارات شمسية مستقطبة وأدرت رأسك بزاوية مقدارها 20° بعيدا عن الخط الرأسي فما هو كسر شدة الضوء المنعكس الذي سيصل إلى عينيك ؟ اعتبر أن العدسات المستقطبة غير ملونة .

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو الشرط اللازم لحدوث استقطاب تام بالانعكاس ؟

الإجابة : أن يكون اتجاه الضوء المنعكس متعامدًا مع اتجاه الضوء المنكسر . ويتحقق هذا الشرط إذا سقط الضوء بزاوية « بروستر » .

سؤال : على أي كميات تعتمد زاوية « بروستر » ؟

الإجابة : تبين المعادلة 9–24 أن $\theta_B = \tan^{-1} n$ ، حيث $n = n_2/n_1$. ومن الجدول 2–23 نجد أن $n_2 = 1.33$(للماء) و $n_1 = 1.0$(للهواء) .

سؤال : ما الذي يحدد كسر الشدة التي تسمح بنفاذها النظارات الشمسية المستقطبة ؟

الإجابة : إذا كان محور النفاذ بالمحلل يميل بزاوية θ بالنسبة لمستوى الاستقطاب ، فإن كسر الضوء النافذ هو $\cos^2\theta$ (من المعادلة 8–24) . وحيث أن النظارات غير ملونة ، فيمكنك اعتبار أنه لا يوجد أي عامل آخر يمنع نفاذ الضوء .

سؤال : ما مقدار θ إذا أدير الرأس بزاوية مقدارها 20° مع الرأسي ؟

الإجابة : تصنع النظارات الشمسية بحيث يكون محور النفاذ رأسيًا عندما يكون رأس الشخص في وضع رأسي . ويكون مستوى الاستقطاب أفقيًا . ومن ثم $\theta = 70°$.

الحل والمناقشة : زاوية بروستر للحد الفاصل بين الهواء والماء هي

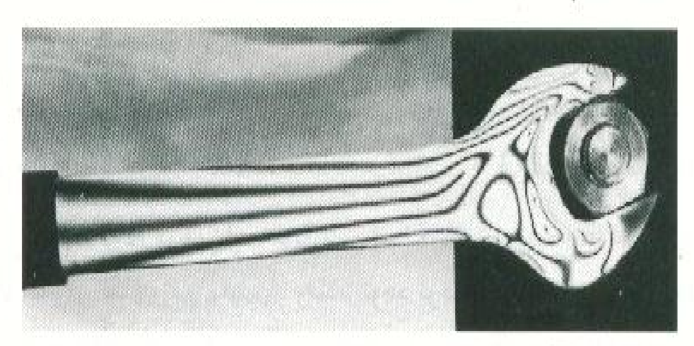
$$\theta_B = \tan^{-1} 1.33 = 53.1°$$

تذكر أن هذه الزاوية مقاسة بالنسبة للخط الرأسي . وكسر الضوء المستقطب الذي ينفذ من خلال العدسات هو

$$\frac{I_{\text{transmitted}}}{I_{\text{incident}}} = \cos^2 70° = 0.117 = 11.7\%$$

جدير بالملاحظة أيضًا أن شدة الضوء المستقطب كليًا والخارج من الماء هي 50 بالمائة من شدة الضوء الساقط على الماء . فإذا ارتديت نظارات مستقطبة فلعلك قد لاحظت تغير شدة الضوء النافذ إلى عينيك عندما تميل برأسك ، حتى وإن كان الضوء مستقطبًا جزئيًا .

يستخدم استقطاب الضوء في العديد من التطبيقات العلمية والتقنية . فالتفاصيل تبدو أوضح تحت الميكروسكوب ، مثلاً ، إذا تم فحصها بين لوحين مستقطبين متعامدين . فالأجزاء التي قد تبدو متشابهة في الضوء العادي ، يمكن أن تختلف بشدة في مقدرتها على تغيير استقطاب الضوء النافذ . ومن ثم فإن التفاصيل التي لا يمكن ملاحظتها في ظروف معينة ، تصبح أكثر وضوحًا ومن السهل رؤيتها . وعندما يوضع جسم شفاف تحت إجهاد مرتفع ، فإن هذا الإجهاد يؤدي غالبًا إلى دوران مستوى استقطاب الضوء النافذ . ونتيجة لذلك فإن الجسم الواقع تحت تأثير إجهادات غير منتظمة سيُظهر حين يوضع بين مستقطبين متعامدين أشرطة متبادلة ما بين مظلم ومضئ كما في الشكل 25-24 . وحيثما تكون الأشرطة أكثر تكدسًا يكون الإجهاد في أقصى حالات عدم الانتظام . وبفحص النماذج المصنوعة من البلاستيك لأجسام منفعلة مثل التي في الشكل 25-24 فإنه يصبح ممكنًا الحكم بدقة على كيفية توزيع الإجهادات . وهذا الأمر على قدر كبير من الأهمية بالنسبة لتصميم الأجزاء المختلفة للآلات .



شكل 25-24:
يظهر الجسم الواقع تحت تأثير الانفعالات ، أشرطة متبادلة ما بين مظلم ومضئ عندما يوضع بين شريحتين متقاطعتين (متعامدتين) من البولارويد . ويكون تغير الإجهاد أكثر ما يمكن حيث تكون الأشرطة أكثر قربًا وتكدسًا من بعضها البعض .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الحيود ، (ب) مبدأ هيجنز ، (جـ) رقم رتبة الهدبة أو خط الطيف ، (د) الموجات الترابطة ، (هـ) حلقات نيوتن ، (و) طول المسار البصري المكافئ ، (ز) محزوز الحيود ، (ح) الزاوية المحددة للتحليل (التفريق) ، (ط) زاوية بروستر .

2 أن تصف تجربة موجات مائية ، تمثل ظاهرة الحيود .

3 أن توضح العلاقة الطورية لموجتين متماثلتين إذا كانتا ستتداخلان (أ) بشكل بنّاء ، و (ب) بشكل هدّام .

4 أن تصف تجربة يونج وكيف يتم الحصول على حزمتين مترابطتين فيها . وأن توضح باستخدام الرسوم السبب في أن هاتين الحزمتين يمكنهما التداخل بشكل هدّام وبشكل بنّاء عند النقط المختلفة . وبأخذ الرسم في الاعتبار ، أن تبرر صحة العلاقة : $n\lambda = d \sin \theta_n$ بالنسبة لمواقع الهدبة المضيئة .

5 أن تستخدم نمط التداخل من شق مزدوج لكي تعين λ إذا علمت ما يكفي من البيانات .

6 أن تحسب المسار البصري المكافئ لسمك مقداره L لمادة معامل انكسارها n .

7 أن تشرح كيفية الحصول على تداخل باستخدام غشاء رقيق أو إسفين وأن تذكر السبب في أن الهدبات تكون ملونة عند استخدام ضوء أبيض . أن تحسب اختلاف سمك الإسفين فيما بين هدبة مظلمة وهدبة مضيئة مجاورة لها .

8 أن تشرح كيفية استخدام محزوز الحيود لقياس الطول الموجي لخط من خطوط الطيف .

9 أن تصف ما يحدث لحزمة ضوئية تنفذ من فتحة إذا جعلت هذه الفتحة ضيقة جدًا . وأن تلتفت بشكل خاص إلى ما يحدث عندما يقترب عرض الفتحة من λ . أن تشرح أهمية هذا التأثير في مقدرتنا على مشاهدة التفاصيل .

10 أن تحسب زاوية السقوط التي من شأنها إنتاج شعاع منعكس ومستقطب تمامًا ، إذا علمت قيمة معامل انكسار مادة السقوط ومادة الانكسار .

11 أن تحسب كسر شدة الضوء المسموح له بالنفاذ عبر لوحي استقطاب يميل محورا النفاذ فيهما بزاوية θ بالنسبة لبعضها البعض .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

الحيود

هو الظاهرة التي بمقتضاها تنحني الموجات لتصل إلى المنطقة التي ما وراء العوائق . ويصبح الحيود ملموسًا عندما يكون قطر العائق مقارب للطول الموجي للموجات .

مبدأ هيجنز

تعمل كل نقطة على جبهة الموجة عمل مصدر نقطي لموجات جديدة .

التداخل

يصف التداخل تراكب سعات موجتين أو أكثر في مكان وزمان معينين . وعندما توجد موجتان متماثلتان وبينهما اختلاف مقداره نصف موجة في الطور فإن السعات يلغي بعضها بعضًا . أما إذا كانت الموجتان متفقتين في الطور فإن سعتيهما تجمعان بشكل بنَّاء .

تداخل مصدرين (تجربة يونج)

عندما تفصل مسافة مقدارها d بين مصدرين للموجات ، يبثان موجات متماثلة في الطور فإن تداخلاً بناءً يحدث بين الموجتين في اتجاه يعطى بالمعادلة :

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

حيث تقاس الزاوية θ بالنسبة لخط يقع في منتصف المسافة بين المصدرين ، باعتبار النقطة الواقعة بين المصدرين هي نقطة الأصل و m أي رقم صحيح . وتسمى قيمة m رتبة التداخل البنَّاء .

ويحدث التداخل الهدَّام عند زوايا تحقق المعادلة

$$\sin \theta_m = (m + \frac{1}{2})\,\lambda$$

طول المسار البصري المكافئ

للطول L من مادة معامل انكسارها n طول مسار بصري مكافئ L_{opt} يعطى من :

$$L_{opt.} = nL$$

ويعني هذا أن نفس عدد الموجات موجود في السمك L من المادة وكذلك في سمك مقداره $L_{opt.}$ من الفراغ .

اختلاف طور الموجات المنعكسة

عندما تنعكس موجة تنتشر في وسط معامل انكساره n_1 بواسطة وسط معامل انكساره $n_2 > n_1$ فإن الموجة المنعكسة ستعاني من اختلاف في الطور مقداره نصف دورة بالنسبة للموجة الساقطة . وإذا كان $n_2 < n_1$ فإن الانعكاس لا يحدث أي اختلاف في الطور .

التداخل في الأغشية الرقيقة

في حالة السقوط العمودي ، فإن التداخل يحدث بين الضوء المنعكس من السطح العلوي والسطح السفلي للغشاء الرقيق (الذي سمكه L ومعامل انكساره n) طبقًا للقاعدة التالية :

- إذا لم يعان أحد الشعاعين أو كلاهما اختلافًا في الطور عند الانعكاس فإن انعكاسًا مضيئًا ينتج عندما يكون المسار البصري جيئة وذهابًا عبر الغشاء يساوي عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية .
- إذا عانى أحد الشعاعين (أي منهما) اختلافًا في الطور عند الانعكاس فإن انعكاسًا مضيئًا ينتج عندما يكون المسار البصري جيئة وذهابا عبر الغشاء يساوي عددًا فرديًا من أنصاف الأطوال الموجية .

محزوز الحيود

يتكون محزوز الحيود من عدد كبير من الفتحات (الشقوق) الضيقة والقريبة جدًا من بعضها البعض . ويتداخل الضوء النافذ من خلال المحزوز بشكل بنَّاء عند زوايا محددة بدقة فحسب ، على أن تخضع هذه الزوايا لمعادلة المحزوز :

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

حيث d هو التباعد بين فتحتين متجاورتين .

الحيود من شق (فتحة) منفردة

نعطي قيمة الزاوية θ_c المحصورة بين القيمة العظمى المركزية ومركز القيمة الدنيا الأولى في نمط حيود من الرتبة الأولى بالمعادلة :

$$\sin \theta_c = \frac{\lambda}{b}$$

حيث b هو عرض الفتحة .

قيود الحيود على التحليل (التفريق) الزاوي

يعتبر العرض الزاوي لدائرة الضوء المركزية في نمط حيود ناشئ عن فتحة دائرية هو الحد النهائي للتحليل أو التفريق بالنسبة لصور مصدرين نقطيين . ويعطى هذا الحد بالمعادلة :

$$\sin \theta_c = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

حيث D هو قطر الفتحة .

الاستقطاب عن طريق الانعكاس (زاوية بروستر θ_B)

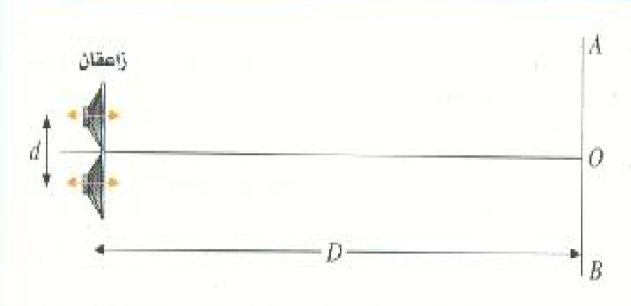
يستقطب الضوء تمامًا بواسطة الانعكاس من على حد فاصل عندما تكون الزاوية بين الشعاع المنعكس والشعاع المنكسر $90°$. وتسمى زاوية السقوط المناظرة لذا الموقف زاوية بروستر ، θ_B ، وتعطى بالمعادلة :

$$\theta_B = \tan^{-1} n$$

حيث n معامل انكسار الوسط العاكس بالنسبة للوسط الذي تسقط منه الأشعة .

أسئلة وتخمينات

1 يتصل الزاعقان المبينان في الشكل م 1-24 بنفس المذبذب (مولد الذبذبات) ويرسلان من ثم موجات صوتية متماثلة . ما هي الشروط التي يمكنك بموجبها أن تلاحظ تأثيرات التداخل إذا سرت على امتداد الخط AB ؟ ماذا يحدث لو حل مصباحان ضوئيان (بصيلتان) محل الزاعقين ؟



شكل م 1-24

2 تقف سيارتان جنبًا إلى جنب في موقف شاغر ضخم للسيارات . وكان نفيراهما « يصرخان » . هل تتوقع أن تتمكن من ملاحظة أية تأثيرات للتداخل من مصدري الصوت ؟ ماذا يحدث لو حل كمانان يعزفان نفس النغمة محل النفيرين ؟

3 يتكون ظل عمود للتليفونات بوضوح نتيجة وجود ضوء صادر من مصدر بعيد . لم لا يلاحظ مثل هذا الأثر (الظاهرة) بالنسبة لصوت صادر من نفير سيارة بعيدة ؟

4 لماذا كان مستحيلاً أن نحصل على هدبات تداخل في تجربة شق مزوج ، عندما يكون التباعد بين الفتحتين أقل من الطول الموجي للضوء الساقط عليهما ؟

5 ابتكر تجربة شق مزدوج ليونج بالنسبة للصوت مستخدمًا زاعق منفرد كمصدر للموجات .

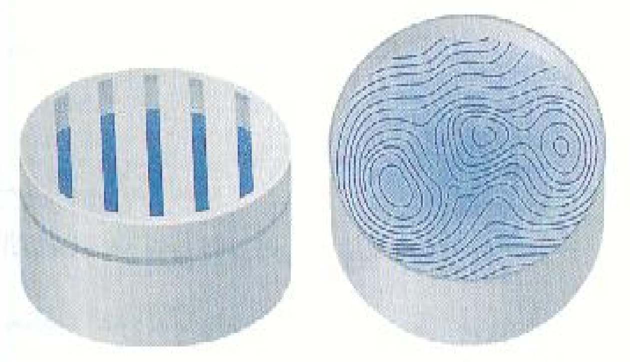
6 يتكون ضوء الزئبق من عدة أطوال موجية . افترض أننا استخدمنا مرشحين في تجربة الشق المزدوج بحيث يمر ضوء (أزرق) $\lambda = 436$ nm عبر إحدى الفتحتين ويمر ضوء (أخضر) $\lambda = 546$ nm عبر الفتحة الثانية . هل يمكن أن نشاهد نمط تداخل على الحائل ؟

7 ما هو التغير الذي يطرأ في تجربة الشق المزدوج ليونج عندما يغمر الجهاز بأكمله في الماء بدلاً من وجوده في الهواء ؟ وما هو التغير الذي يشاهد في تجربة حلقات نيوتن إذا ملئ الحيز بين الشريحة الزجاجية والعدسة بالماء ؟

8 ترسب أغشية رقيقة أحيانًا على شرائح زجاجية . ويمكننا التحكم في سمك الغشاء بمراقبة التغير في لون الضوء الأبيض المنعكس من سطحه ، كلما زاد سمك الغشاء . اشرح هذه الظاهرة .

9 لماذا يقوم سطح معدني أو زجاجي عليه غشاء رقيق من الزيت ، بعكس ألوان قوس قزح في أغلب الأحيان عندما ينعكس عليه ضوء أبيض ؟

10 يصور الشكل م 2-24 هدبات تداخل تشاهد عندما توضع شرائح زجاجية على أسطح مستوية بصريًا (وتسمى **أسطح بصرية الاستواء**) . اذكر ما تعرفه عن سطح الشريحتين المستخدمتين هنا .



شكل م 2-24

11 افترض أن فتحتين (شقين) إضافيتين قد أضيفتا إلى الشقين الأصليين في تجربة الشق المزدوج ليونج ، بواقع فتحة إلى جانب كل من الفتحتين الأصليتين ، بحيث صار هناك أربع فتحات ذات تباعد متساوي .

وقد لوحظ أنه عند مسافة معينة بين الفتحات والحائل ، تكون النقطة المركزية لنمط الهدبات مظلمة . فسر كيفية حدوث هذه الظاهرة ؟

12 اشرح العبارة التالية : يكون الفرق فى السمك بين موضع هدبتين مضيئتين متجاورتين فى نمط تداخل غشاء رقيق هو صفر أو $\lambda/2n$ ، حيث λ هو الطول الموجى للضوء المستخدم و n معامل انكسار مادة الغشاء .

13 هل من اللازم أن تكون قوة تفريق الميكروسكوب أفضل إذا استخدم ضوء أزرق بدلاً من الضوء الأحمر ؟ اشرح .

14 هب أنك أعطيت محزوز حيود ثوابته معروفة ؛ كيف تستخدمه فى تعيين الطول الموجى لأحد خطوط الطيف المجهولة ؟

15 اضغط شريحتين من الزجاج المسطح بضمهما معًا بقوة (تعتبر شريحتا الميكروسكوب مثاليتين فى هذه التجربة) وبطرق متعددة ثم حاول أن تقدر من تداخل الضوء مدى التصاق السطحين معًا . (تستطيع رؤية نمط التداخل بسهولة فى أية غرفة مضاءة **بشرط** ضغط الشريحتين معًا بدرجة كافية) .

16 إذا اعتبرت أن الحيود الناشئ عن إنسان عينك هو العامل المحدد ، فكم يكون بعد سيارة قادمة فى اتجاهك إذا بدأ مصباحاها الأساسيان فى التفرق عن بعضهما ؟

17 ما الذى يحدث للطاقة الضوئية التى لا ينفذها لوح استقطاب عندما يسقط عليه ضوء غير مستقطب ؟ هل يمكنك التفكير فى أية عيوب تتعلق باستعمال لوح الاستقطاب ؟

18 كيف يمكن لنا أن نحدد ما إذا كانت حزمة الضوء مستقطبة أم لا ؟ وما إذا كانت تتألف من حزمتين إحداهما مستقطبة والأخرى غير مستقطبة ؟

مسائل

القسمان 24-1 و 24-2

1 يقوم مصدران موجيان متماثلان يقعان عند نقطة أصل الإحداثيات بإرسال موجات متفقة فى الطور وذات طول موجى مقداره 60 cm نحو مشاهد يقف على المحور x عند $x = 6.0$ m . ثم حرك أحد المصدرين ببطء على طول المحور بعيدًا عن المشاهد . ما هى أول ثلاث إحداثيات على محور x لهذا المصدر يمكن للمشاهد عندها أن يكتشف (أ) تداخلاً بنّاءً و (ب) تداخلاً هدّامًا ؟

2 افترض أن المصدرين المذكورين فى المسألة السابقة يقعان عند نقطة الأصل ويرسلان موجات ذات طول موجى معروف ومتفقة فى الطور . وعندما يُحرك مصدر منهما ببطء فى اتجاه القيم السالبة للإحداثى x ، فإن المشاهد يلاحظ تداخلاً بناءً عند نقط متعددة على محزوز x ، وكانت المسافة بين نقطتين متجاورتين من تلك النقط هى 20 cm . ما هو الطول الموجى للموجات ؟

3 تبث محطة إذاعية موجات طولها الموجى 320 m . ويقوم جهاز استقبال منزلى (راديو) يبعد بمسافة 16 km عن المحطة باستقبال تلك الموجات حال وصولها إليه عن طريقين . وأحد الطريقين مباشر من المحطة أما الثانى فهو الطريق الذى تسلكه الموجات بعد انعكاسها من جبل يقع وراء المنزل الذى به الراديو مباشرة . أوجد أدنى مسافة بين الجبل والجهاز (الراديو) بحيث يحدث تداخل هدّام عند الجهاز . اعتبر عدم وجود تغير فى الطور عند الانعكاس من على الجبل .

4 يبين الشكل م 24-1 مصدرى صوت متماثلين يهتزان معًا فى نفس الطور ويبثان موجات طولها الموجى 20 cm . ويسمع الحد الأقصى والحد الأدنى للصوت عند تحريك جهاز استقبال على طول الخط AB . ما مقدار فرق المسار بين المصدرين عند (أ) أول قيمة عظمى عند أحد جوانب O و (ب) ثانى قيمة دنيا عند أحد جوانب O ؟

▪ 5 يبعث مصدرا الصوت المتماثلان المبينان فى الشكل م 24-1 موجات متفقة فى الطور . ويلاحظ مشاهد عند النقطة A حدوث صوت مرتفع عندما يصنع خط ممتد من منتصف المسافة بين المصدرين والنقطة A زاوية مقدارها 30° مع الخط الممتد من منتصف المسافة بين المصدرين والنقطة O . فإذا كان $d = 30$ cm ، فما هو الطول الموجى الممكن لموجات الصوت ؟ اعتبر أن $d \ll D$.

▪ 6 يهتز مصدرا صوت متماثلان متفقان فى الطور ويبعثان بموجات طولها الموجى 60 cm نحو أحدهما الآخر على المحور x .

ويقع المصدران عند $x = 0$ و $x = 6.0$ m على الترتيب . عند أية نقط على المحور x بين المصدرين يكون الصوت الإجمالي (أ) عند أقصى قيمة له و (ب) عند أدنى قيمة ؟

7 يهتز مصدرا موجات لاسلكي متماثلان وترددهما متغير بحيث يكونان متفقين في الطور . ويرسلان موجات نحو أحدهما الآخر على طول المحور x . ويفصل بين المصدرين على محور x مسافة مقدارها 4.0 km . ثم وضع جهاز استقبال (راديو) منزلي بينهما على مسافة مقدارها 2.5 km من أحد المصدرين . وتمت زيادة الترددات المتساوية للمصدرين بدءًا من الصفر في نفس الوقت . ولوحظ أن الشدة المركبة للموجات اللاسلكية الملتقطة بالجهاز تتناقص مع زيادة التردد حتى تصل إلى قيمتها الدنيا ثم تبدأ في الزيادة مرة أخرى . ما هو الطول الموجي للموجات اللاسلكية عند نقطة الشدة الدنيا ؟

القسم 3-24

8 استخدم ضوء أحادي اللون طوله الموجي 436 nm في تجربة الشق المزدوج ليونج ، فوجد أن القيمة العظمى للرتبة الأولى تحدث عند °3.2 . (أ) ما هو التباعد بين الفتحتين ؟ (ب) وما هي الزاوية التي تحدث عندها القيمة العظمى للرتبة الثانية ؟

9 المسافة بين الفتحتين في تجربة الشق المزدوج ليونج هي 0.10 mm ، والطول الموجي للضوء المستخدم هو 600 nm . (أ) ما هي الزاوية التي تحدث عندها القيمة العظمى للرتبة الثالثة ؟ (ب) والقيمة العظمى للرتبة الخامسة ؟

10 يسقط ضوء أخضر طوله الموجي 550 nm على زوج من الفتحات الضيقة التي تفصل بينهما مسافة مقدارها 0.5 mm . ما هي الزاوية التي تشاهد عندها القيمة العظمى للرتبة الثانية ؟

11 يبعث مصدرا الصوت المبينان في الشكل م 1-24 موجات متفقة في الطور وطولها الموجي 60 cm . فإذا كان $d = 6.0$ m و $D = 30$ m فعلى أي بعد على طول AB من O تكون (أ) القيمة العظمى للرتبة الأولى و (ب) القيمة الدنيا للرتبة الأولى ؟

12 التباعد بين الفتحتين في تجربة الشق المزدوج هو 0.2 cm والمسافة بين الفتحتين والحائل هو 1.2 m . والطول الموجي للضوء الساقط على الفتحتين هو 480 nm . حدد مواقع أول ثلاث من (أ) القيم العظمى . (ب) القيم الدنيا على جانبي القيمة العظمى المركزية بالنسبة لموضع الهدبة المضيئة المركزية .

13 يسقط ضوء طوله الموجي 460 nm على شقين بينهما مسافة 0.4 mm . ما هي المسافة بين الشقين والحائل إذا كان التباعد بين الهدبتين المظلمتين ، الأولى والثانية هو 3.6 mm ؟

14 كم يبلغ التباعد بين الشقين في تجربة الشق المزدوج إذا كانت القيمة العظمى للرتبة الثانية تبعد 6.5 mm عن الهدبة المضيئة المركزية ؟ المسافة من الحائل إلى الشق 2.0 m والطول الموجي للضوء المستخدم 550 nm .

15 يسقط ضوء أزرق طوله الموجي 434 nm على الفتحتين في تجربة الشق المزدوج . ويفصل بين القيم العظمى للتداخل 1.00 mm على حائل يبعد 1.0 m عن الفتحتين . كم يبلغ التباعد بين القيم العظمى المتتابعة إذا استخدم ضوء أحمر طوله الموجي 656 nm لإضاءة الفتحتين ؟

16 عند استخدام ضوء الزئبق ($\lambda = 436$ nm) في تجربة الشق المزدوج ، فإن القيمة العظمى للرتبة الأولى تحدث عند زاوية مقدارها 4.0×10^{-4} rad. وعند استبدال مصدر مجهول طوله الموجي بهذا الضوء فإن القيمة العظمى للرتبة الثانية تحدث عند 6.0×10^{-4} rad. (أ) ما هو الطول الموجي لضوء المصدر الثاني ؟ (ب) وفي أي مناطق الطيف يوجد هذا الضوء ؟

17 يسقط ضوء أبيض يغطي مدى الأطوال الموجية من 400 nm إلى 700 nm على زوج من الفتحات تفصلهما مسافة 0.3 mm ويشاهد التداخل على حائل يبعد 1.8 m عن الفتحتين . أوجد المسافة بين القيم العظمى من الرتبة الأولى للألوان : البنفسجي ($\lambda = 400$ nm) و الأحمر ($\lambda = 700$ nm) .

18 تستخدم في تجربة الشق المزدوج ليونج فتحتان يفصل بينهما 0.30 mm ثم غمر الجهاز بأكمله في الماء . عند أية زوايا تظهر أول قيمتين عظميين للتداخل ، إذا كان الطول الموجي للضوء المستخدم في الفراغ هو 550 nm ؟

القسمان 4-24 و 5-24

19 غطي لوح زجاجي مسطح بطبقة رقيقة من مادة معامل انكسارها 1.3 . كم يبلغ سمك هذه الطبقة إذا كان ضوء طوله الموجي 450 nm ويسقط عموديًا ينفذ بحد أدنى من الانعكاس ؟

20 ما هو سمك الطبقة المذكورة في المسألة رقم 19 إذا كان ضوء طوله الموجي 560 nm يتعرض لأقصى انعكاس ممكن ؟

▪ 21 غطي لوح من زجاج كراون بغشاء رقيق سمكه 140 nm . وعندما يسقط ضوء طوله الموجي 530 nm عموديًا على الغشاء فإنه ينفذ تمامًا بحد أدنى من الانعكاس . أوجد معامل انكسار الغشاء . (**تلميح** : فكر في أي اختلافات الطور تكون ضرورية لجعل $n > 1$) .

22 يسقط ضوء أبيض على لوح زجاجي رقيق سمكه 400 nm ومحاط تمامًا بالهواء . ما هي الأطوال الموجية في الطيف المرئي للضوء الأبيض ، سيكون انعكاسها أقوى ما يمكن عند السقوط القريب من العمودي ؟ اعتبر معامل انكسار الزجاج 1.5 .

▪ 23 تعكس فقاعة صابون بقوة كلاً من الضوءين الأحمر ($\lambda = 700$ nm) والأخضر ($\lambda = 500$ nm) إذا سلط عليها ضوء أبيض . فإذا كان معامل انكسار الفقاعة 1.40 ، فما هو سمكها الذي يسمح بحدث هذا الانعكاس ؟

▪ 24 انسكبت بقعة من الزيت الشفاف معامل انكسارها 1.26 على سطح المحيط وقد وجد أن الضوء البرتقالي يعاني أقصى انعكاس له عندما يسقط عموديًا على غشاء الزيت . ما هو أدنى سمك لغشاء الزيت ؟ اعتبر معامل انكسار ماء المحيط هو نفس معامل انكسار الماء النقي أي $n = 1.33$.

▪ 25 غطيت مرآة معدنية بطبقة رقيقة من البلاستيك (معامل انكساره $n = 1.6$) على سطحها . وقد وجد أن شدة الأشعة المنعكسة تكون عند حدها الأدنى عندما يكون الطول الموجي للضوء 550 nm . أوجد أقل سمكين ممكنين للغشاء .
(**تلميح** : اعتبر أن $n \to \infty$ بالنسبة للمعادن) .

26 تكوّن شريحتان زجاجيتان مسطحتان فيما بينهما إسفينًا هوائيًا رقيقًا للغاية . وعندما ينظر إلى المجموعة في ضوء طوله الموجي 500 nm ، فإن هدبة مظلمة تظهر عند خط اتصال الشريحتين . ما هو سمك الإسفين الهوائي عند (أ) أول هدبة مضيئة و (ب) ثالث هدبة مضيئة ؟

27 عندما ينعكس ضوء أصفر (طوله الموجي 589 nm) من على إسفين هوائي تكون بين شريحتين زجاجيتين مسطحتين فإن التباعد بين هدبتين مضيئتين يكون 0.6 cm . (أ) ما سمك الإسفين الهوائي على بعد 5.0 cm من خط اتصال الشريحتين ؟ اعتبر أن الإسفين يشاهد بواسطة أشعة تسقط عموديًا . (ب) أعد المسألة باعتبار أن الإسفين مملوء بزيت معامل انكساره 1.4 وليس بالهواء .

▪ 28 لشريحة زجاجية على هيئة إسفين معامل انكسار مقداره 1.56 . وعندما ينظر إلى الإسفين مباشرة من أعلى بواسطة ضوء طوله الموجي 460 nm فإن حافته المدببة تكون مظلمة . ما هو سمك الإسفين عند الهدبة الرابعة المضيئة ؟

▪ 29 تظهر هدبات التداخل على بقعة زيت تطفو فوق بركة ماء . ما هو فرق سمك بقعة الزيت عند هدبتين خضراوين متجاورتين ؟ اعتبر معامل انكسار الزيت 1.4 والطول الموجي للضوء الأخضر 500 nm .

30 يستخدم ضوء الصوديوم الذي طوله الموجي 590 nm لإنتاج حلقات نيوتن ، وكان نصف قطر الحلقة العاشرة المظلمة 1.64 cm . (أ) ما مقدار الفجوة الهوائية في هذا الموقع ؟ (ب) وإذا ملئت الفجوة بالماء فما هو مقدار الفجوة في الموضع الجديد للحلقة العاشرة المظلمة ؟ مع العلم بأن النقطة المركزية للنمط مظلمة .

▪ 31 يستقر الجانب المحدب لعدسة محدبة مستوية (أي أن أحد جانبيها مستو والآخر محدب) على شريحة مسطحة من الزجاج ، وكان نصف قطر الانحناء لهذا الجانب 4.0 m . ثم سلط ضوء على الوجه الأمامي للعدسة بحيث كان سقوط الأشعة عموديًا ولم يكن الطول الموجي للضوء معروفًا . ووجد أن نصف قطر الحلقة المظلمة رقم 30 هو 5.5 mm كما أن

النقطة المركزية للنمط مظلمة . ما هو الطول الموجى للضوء المتسبب فى هذا النمط ؟

القسم 6–24

32 وجِّه ضوء طوله الموجى 680 nm إلى محزوز به 4000 خط فى كل سنتيمتر . ما هـو الانحـراف الـزاوى لـهذا الضـوء فـى حالة (أ) الرتبة الأولى و (ب) الرتبة الثالثة ؟

33 يسلط طالب ضوءً أحمر من ليزر الـهليوم ـ نيون ($\lambda = 632.8$) عبر محزوز حيود لمعايرته . وتحـدث القيمـة العظمـى للرتبـة الأولى عند زاوية مقدارها 19^o . (أ) ما مقدار تباعد المحزوز ؟ عند أية زاوية تظهر القيمة العظمى للرتبة الثالثة ؟

34 الخط الثنائى للضوء الأصفر الصادر من قوس الصوديوم ، مكون من طولين موجيين همـا 588.995 nm و 589.592 nm . احسب التباعد الزاوى بين هذين الخطين فى الطيف من الرتبة الأولى والناتج بواسطة محزوز يحتوى على 5000 خـط فـى السنتيمتر . أعد المسألة بالنسبة لطيف من الرتبة الثانية .

35 لديك محزوز حيود يحتوى على 6000 خط فى السنتيمتر . احسب التباعد الزاوى بين الخط الأزرق (435.8 nm) والخط الأخضر (546.1 nm) للزئبق فى حالة : (أ) طيف الرتبة الأولى و (ب) طيف الرتبة الثانية .

36 احسب الموقع الزاوى لطيف الرتبة الثانية لخط الصوديوم الأصفر (589 nm) النـاتج بواسطة محـزوز حيـود يحتـوى على 5600 خط فى السنتيمتر .

37 وجد أن الخط الأخضر للرتبة الثانية ($\lambda = 546$ nm) يقع عند زاوية 41.0^o باستعمال محزوز معين . عند أية زاوية سيوجد الخط الأصفر للرتبة الأولى ($\lambda = 589$ nm) .

■ 38 يسقط ضوء طوله الموجى 579 nm عموديًا على محزوز به 5000 خط فى السنتيمتر . كم عدد رتب الحيود المختلفـة التى يمكن رؤيتها للضوء النافذ ؟

■ 39 استُخدم محزوز حيود به 6000 خط فى السنتيمتر داخل خزان كبير للماء . ما هى أصغر ثلاث زوايا (فـى المـاء) يمكـن أن يُرى عندها خط الزئبق الأخضر (546.1 nm) ؟

■ 40 يسقط ضوء أبيض يغطى الأطوال الموجية من 400 إلى 700 nm على محزوز به 4000 خط فى السـنتيمتر . مـا هـو عـرض طيف الرتبة الأولى على حائل يبعد 1.6 m عن المحزوز ؟

القسمان 7–24 و 8–24

41 أوجد العرض الزاوى للقيمة العظمى المركزية (أى الزاوية التى بين القيمتين الصغريين للرتبة الأولى) فى حالة شـق منفـرد عرضه 0.030 cm ويسلط عليه ضوء طوله الموجى 590 nm .

42 سلط ضوء طوله الموجى 436 nm على فتحة منفردة ، فظهرت ، القيمة الدنيا (الصغرى) للرتبة الأولى للحيود عند زاويـة مقدارها 1.8^o بالنسبة لمركز نمط الحيود . ما هو عرض الفتحة ؟

■ 43 شوهد نمط الحيود الناتج بواسطة ضوء طوله الموجى 589 nm ويمر عبر فتحة ضيقة عرضها 0.2 mm ، على حائل يبعـد 1.0 m عن الفتحة . أوجد عرض القيمة العظمى المركزية كما تشاهد على الحائل .

44 تكون نمط حيود شق منفرد عن طريق إمرار ضوء عبر فتحة ضيقة عرضها 0.060 mm . وكان عرض القيمة العظمى المشـاهد على حائل يبعد 2.0 m عن الفتحة هو 4.25 cm . ما هو الطول الموجى للضوء المستخدم ؟

■ 45 سُمح لأشعة تحت الحمراء طولـها الموجى 12.4 μm بالمرور عبر فتحة ضيقة ويتبين من نمط الحيود المشاهد على حائل يبعد 1.2 m عن الفتحة أن تباعد أول قيمتين صغيرتين للرتبة الأولى على جانبى القيمة العظمى المركزية هو 0.6 mm . كم سيبلغ التباعد الجديد بين القيمتين الصغريين للرتبة الأولى إذا انخفض عرض الفتحة إلى النصف ؟

■ 46 ينظر رجل نحو المصابيح الأمامية لشاحنة بعيدة . فإذا كان قطر إنسان عينه هو 0.24 cm فكم يكون بعد الشاحنة عنه إذا كان المصباحان الأماميان لهما قد بدءا في التفرق ؟ اعتبر أن العامل المحدد لهذا هو الحيود الناتج عن إنسان العين . واعتبر أيضًا أن الطول الموجي للضوء 490 nm والمسافة بين المصباحين 1.6 m . ما الذي يمكنك استنتاجه من هذه النتيجة ؟

■ 47 استخدمت عدسة قطرها 3.0 cm لتكوين صورة شريحة فوتوغرافية على شاشة (حائل) تبعد 2.8 m ؛ وقد وضعت العدسة على بعد 10 cm من الشريحة . اعتبر أن العدسة نموذجية أن الحيود هو العامل الوحيد الذي يحد من قدرتها على تكوين الصورة . كان الضوء المستخدم ذا طول موجي 490 nm . ما مدى قرب نقطتين ضئيلتين على الشريحة إذا كان المطلوب تفريقهما على الحائل ؟ وكم يبلغ تباعدهما على الحائل ؟

■ 48 يستخدم تليسكوب « هيل » في مرصد جبل باليمور بكاليفورنيا ، مرآة مقعرة قطرها 5.0 m . ما هي أقل مسافة بين نقطتين على سطح القمر بحيث يمكن تفريقهما (تحليلهما) بهذا التليسكوب ؟ مع العلم بأن المسافة بين الأرض والقمر 3.8×10^8 m . اعتبر أن الطول الموجي للضوء المرصود 500 nm .

القسم 9-24

49 عندما يصطف مستقطبان في خط واحد هو اتجاه استقطابهما ، فإنهما ينفذان ضوءًا شدته I_0 . ما هي النسبة المئوية لهذه الشدة التي سيتم نفاذها لو كان بينهما زاوية مقدارها $50°$ ؟

50 عندما يكون محورا الاستقطاب في مستقطبين متماثلين متجهين باتجاه واحد فإنهما ينفذان ضوءًا شدته I_0 . ما هي الزاوية التي بينهما إذا كانت الشدة النافذة ستصبح $\frac{1}{2} I_0$ ؟

51 وجِّه مستقطبان بزاوية مقدارها $40°$ فنفذ منهما ضوء شدته I_1 . كم ستكون شدة الضوء النافذ إذا تم توجيه المستقطبين بحيث كان محورا استقطابهما متوازيين ؟

■ 52 يُنفذ مستقطب نموذجي 50 بالمائة من شدة الضوء الساقط عندما يكون هذا الضوء غير مستقطب . ويسقط ضوء غير مستقطب شدته I_0 على مُستقطب نموذجي محور استقطابه رأسي . ثم يمر الضوء النافذ عبر مستقطب ثان محوره يميل بزاوية مقدارها $30°$ مع الخط الرأسي . وفي النهاية ، يمر الضوء عبر مستقطب ثالث اتجاه استقطابه أفقيّ . أوجد شدة الضوء الخارج من المستقطب الثاني والمستقطب الثالث .

53 يسقط ضوء غير مستقطب من الهواء على سطح زجاجي معامل انكساره 1.54 . ما هي زاوية السقوط المناظرة للحد الأقصى من الاستقطاب في الضوء المنعكس ؟

54 ما هي زاوية بروستر بالنسبة للحد الأقصى من الاستقطاب لضوء ينعكس عند السطح البيني للماء والهواء ؟ اعتبر أن الضوء يسقط وهو داخل الماء .

■ 55 اثبت أن زاوية بروستر ـ بالنسبة لوسط شفاف يحيط به الهواء ـ بحيث يتوافر الحد الأقصى للاستقطاب بالانعكاس (θ_B) ، ترتبط مع الزاوية الحرجة بالنسبة للانعكاس الداخلي الكلي θ_c بالعلاقة : $\cot \theta_B = \sin \theta_c$.

■ 56 احسب زاوية السقوط عند حدوث أقصى استقطاب بالنسبة لضوء ينعكس من السطح البيني الفاصل بين الماء والزجاج ، باعتبار أن الضوء يسقط من داخل الماء . اعتبر أن معامل الانكسار للزجاج هو 1.52 .

■ 57 تسقط حزمة ضوء بزاوية بروستر على قطعة من مادة بلاستيكية معامل انكسارها 1.62 . ما هي زاوية انكسار الحزمة النافذة ؟

مسائل عامة

■ 58 يتم استقبال موجات الإذاعة اللاسلكية ذات الطول الموجي 200 m ، بواسطة راديو منزلي يقع على بعد 200 km من محطة الإرسال وذلك عن طريقين . أحدهما مسار مباشرة من المحطة والثاني يمر بانعكاس الموجات على شاحنة تقترب من

المستقبل (الراديو) من الناحية المواجهة لجهاز الإرسال ، على امتداد خط مستقيم يصل بين المرسل والمستقبل . ولقد لوحظ تداخلان هدامان متتابعان للموجات عند المستقبل فى فترة زمنية مقدارها 18 s . ما هى سرعة الشاحنة ؟

■ 59 يسقط ضوء طوله الموجى 560 nm مع ضوء طوله الموجى مجهول على فتحتين غير معلوم التباعد بينهما . ويسقط الضوء المناظر للقيمة العظمى للرتبة الرابعة والذى طوله الموجى 560 nm فى نفس الموقع تمامًا الذى يسقط فيه الضوء ذو الطول الموجى المجهول والمناظر للقيمة العظمى للرتبة الخامسة . (أ) ما هو الطول الموجى للضوء المجهول فى الهواء ؟ (ب) أعد المسألة لو كانت المجموعة كلها فى الماء .

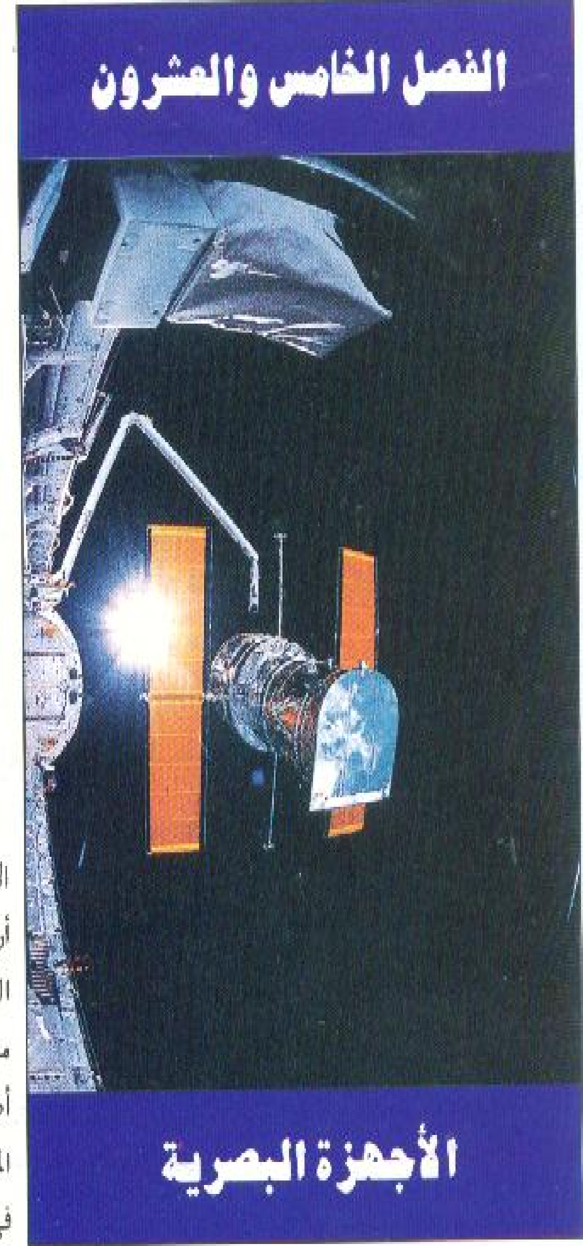
■ 60 يسقط ضوء طوله الموجى 620 nm على نظام شق مزدوج مغمور فى الماء . وقد تكوّن نمط تداخل على حائل يبعد 2.0 m عن نفس خزان المياه . ما هى المسافة بين القيمة العظمى المركزية إلى القيمة العظمى للرتبة الثانية الظاهرتين على الحائل ، إذا كانت المسافة بين الفتحتين هى 0.5 mm ؟

■ 61 لديك شريحتان زجاجيتان متوازيتان ملتصقتان فى البداية ويشاهدان من أعلى مباشرة بواسطة ضوء طوله الموجى 590 nm (أصفر) ومنعكس عموديًا على السطحين تقريبًا . وعندما تزداد المسافة بين الشريحتين ببطء فإن الظلام يشاهد عند مسافات تباعد معينة . (أ) ما هى القيم الثلاث الأولى لمسافات التباعد تلك ؟ **تلميح** : يشاهد الإظلام عندما يكون التباعد بين الشريحتين صفرًا . (ب) أعد المسألة بالنسبة للفجوة بين الشريحتين عندما تمتلئ بالماء .

■■ 62 (أ) هل يمكن تصميم محزوز بحيث يتراكب خط طوله الموجى 600 nm من الرتبة الأولى مع خط بنفسجى طوله الموجى 400 nm من الرتبة الثانية ؟ (ب) فإذا كان ذلك ممكنًا ، فكيف ؟ (جـ) وإذا لم يكن ممكنًا ، فهل بالاستطاعة عمل هذا بالنسبة لتوليفات أخرى للرتب ؟ (د) وإذا لم يكن ممكنًا فكيف يتم ذلك ؟

■■ 63 للمظلات المصنوعة من الصلب عادة سطح معدنى متعرج ، بحيث تتكرر الانبعاجات كل 10 cm أو نحو ذلك . وعند اختيار الظروف المناسبة فإن هذا النوع من الجدران قد يعمل كمحزوز انعكاس للموجات الصوتية . ما هى قيمة λ للموجات الصوتية الساقطة عموديًا والتى تؤدى إلى قيمة عظمى من الرتبة الأولى عند زاوية مقدارها $41°$ مع العمود ؟

■■ 64 يطفو لوح من البلاستيك الرقيق المعتم على سطح بركة سباحة عمقها 4.0 m ، وكان باللوح فتحة ضيقة عرضها 0.15 mm ثم أسقط ضوء ليزر طوله الموجى 633 nm عموديًا على اللوح . ما هو عرض القيمة العظمى المركزية لنمط الحيود المتكون عند قاع البركة ؟

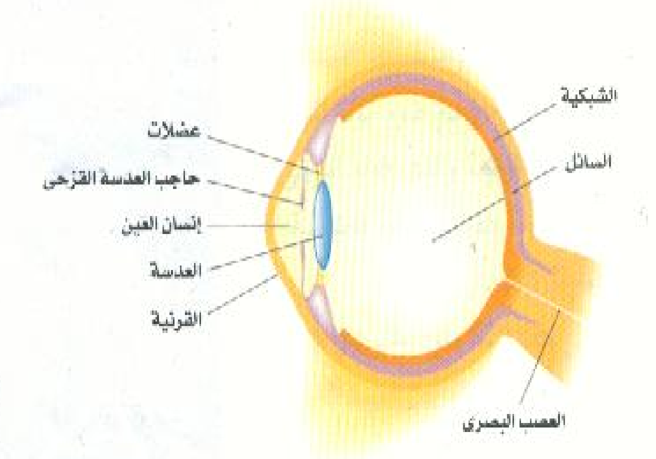


الآن وقد فهمنا مبادئ الانعكاس والانكسار والتشتت ، نستطيع أن نناقش كيف تطبق هذه المبادئ في بعض الأجهزة (النبيطات) البصرية الشائعة . وسوف نتطرق لمناقشة أجهزة تكون صورًا ، مثل العين والميكروسكوب وأجهزة أخرى تستخدم في قياس أطياف الضوء . ولن نحصل على مزيد من التدريب على حل المسائل فحسب ، ولكننا سنصبح على قدر أفضل من الكفاءة في استخدام هذه الأجهزة في تطبيقات شديد التنوع .

25-1 العين

يوضح الشكل 1-25 رسمًا مبسطًا للعين . ولعلك تعلم بالفعل أن قرنية العين هي غطاء واق ، وأن حاجب العدسة القزحي يتحكم في كمية الضوء الداخل إلى العين أما الشبكية فهي السطح الحساس الذى يحول الصورة المتكونة عليه إلى طاقة كهربية تنقل بعد ذلك إلى المخ . والشعاع الضوئي الداخل إلى العين ينكسر عند القرنية . وتحدث ظواهر انكسارية بدرجة أقل في إنسان العين وعدستها لأن معاملات انكسار القرنية وإنسان العين والعدسة والأجزاء السائلة في العين ، كلها متماثلة تقريبًا .

وهذه الظواهر الانكسارية مجتمعة ، تكون صورة للأجسام البعيدة على الشبكية بالنسبة لعين طبيعية مسترخية . ومن ثم فالبعد البؤرى للعين يقارب المسافة بين الشبكية والعدسة مقاسة على المحور الرئيسي للعدسة . ونعلم من رسم مسار الأشعة



شكل 25-1:
رسم توضيحى لعين بشرية .

وأيضًا من معادلة العدسة (المعادلة 23-2) أنه بالنسبة لبعد بؤرى ثابت ، لابد أن يزداد بعد الصورة كلما اقترب الجسم من العدسة . إلا أنه بالنسبة للعين ؛ لابد أن تظل الصورة متكونة على الشبكية ؛ بمعنى أن بعد الصورة لابد أن يظل ثابتًا ويتطلب هذا - بالطبع - أن يكون البعد البؤرى للعين متغيرًا ، وهذه فى الواقع هى الوظيفة الأساسية لعدسة العين . وعلى الرغم من أنها تسهم بقدر يتراوح بين 20 و 25 بالمائة فقط من الانكسار الكلى ، فإن القدرة على تغيير شكل العدسة هو الذى ينتج التغير المطلوب فى البعد البؤرى . وعندما يركز الشخص بصره على جسم قريب فإن **العضلات الهدبية** المتصلة بالعدسة تجعلها أكثر سمكًا وبذلك تصبح العدسة أكبر قدرة على تجميع الأشعة ويصبح بعدها البؤرى أقصر . ويقتصر هذا التعديل بالنسبة للعين العادية على الأجسام التى توضع على حد أدنى للمسافة مقداره نحو 25 cm أمام العين . وهكذا فإن العين العادية قادرة على التركيز على أجسام يتراوح بعدها من **النقطة البعيدة** عند مالانهاية (حيث تكون عضلات العين مسترخية) إلى **النقطة القريبة*** التى تقع على مسافة 25 cm من العين .

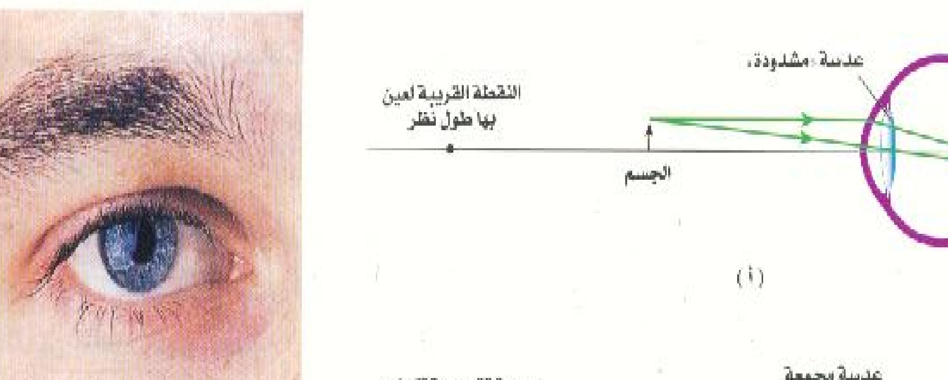
شكل 25-2:
(أ) لا تستطيع عدسة العين المصابة بقصر النظر أن تركز على أجسام فيما وراء نقطة بعيدة معينة .
(ب) ولإصلاح هذا العيب (الميوبيا) تستخدم عدسة تصحيحية مفرقة لكى تكون صورة تقديرية لجسم بعيد عند النقطة البعيدة للعين .

* يمكنك معرفة المسافة المناظرة للنقطة القريبة لعينيك إذا أمسكت بصفحة مكتوبة وأخذت تقربها من عينيك إلى المدى الذى لا تصبح بعده واضحة . وعند هذا الحد تتحدد النقطة القريبة لعينيك .

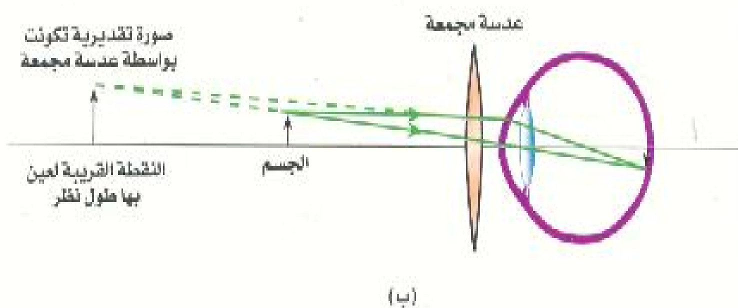
ولا تستطيع العين عند كثير من الناس أن تسترخى بما فيه الكفاية لكى تركز صورة جسم بعيد جدًا على الشبكية ، ويسمى هذا بقصر النظر أو « الميوبيا » . حيث تظل العين مجمعة أكثر من اللازم ، فتكوِّن صورة الجسم البعيد أمام الشبكية بشكل ملحوظ كما فى الشكل 2-25 (أ) . والعين المصابة بقصر النظر قادرة على التركيز فقط على أجسام أقرب من نقطة بعيدة معينة محددة . ويتم تصحيح قصر النظر بإضافة عدسة مفرقة أمام العين ، لكى تؤخر تكوين الصورة إلى أن يصل الضوء إلى الشبكية .



تعتبر العين البشرية مثالاً رائعًا على آلة التصوير (الكاميرا) البسيطة . فعدسة العين تركز الضوء فى بؤرة على الشبكية وتضبط القزحية فتحة المدخل حسب الظروف المتغيرة لشدة الضوء .



(أ)



(ب)

شكل 3-25:
(أ) لا تستطيع عدسة عين مصابة بطول النظر (هيبروبيا) أن تركز على أجسام عند مسافات أقل من 25 cm ، وهى النقطة القريبة الطبيعية . (ب) ولتصحيح طول النظر تستخدم عدسة مجمعة تنتج صورة تقديرية عند النقطة القريبة للعين عندما يوضع جسم على مسافة مقدارها 25 cm . ولابد أن يكون البعد البؤرى للعدسة التصحيحية أكبر من 25 cm . لماذا ؟

وهناك وسيلة أخرى لفهم وظيفة العدسة التصحيحية . . وتتضح إذا تذكرنا أن الصورة التى تكونها ستصبح بمثابة جسم لعدسة العين . ولذا يكون على العدسة التصحيحية أن تكوِّن صورة تقديرية لجسم بعيد فى مالانهاية عند النقطة البعيدة لعين تعانى من قصر النظر (الميوبيا) والشكل 2-25 (ب) يوضح هذا الموقف .

هناك عيب ثان للإبصار وهو **طول النظر أو (هيبروبيا)** (الشكل 3-25) والعين المصابة بهذا العيب لا يمكنها أن تصبح مجمعة بما يكفى لكى تركز صورة الأجسام الواقعة عند النقطة القريبة الطبيعية . والأشخاص الذين يعانون من طول النظر لديهم نقطة بعيدة طبيعية ولكنهم بحاجة إلى عدسة تصحيحية **مجمعة** حتى تقرب الأجسام إلى مسافة 25 cm . ولابد من اختيار العدسة التصحيحية بحيث لو وضع جسم على بعد 25 cm من العين ، فإنها تكوِّن صورة تقديرية عند النقطة القريبة الأكثر بعدا للعين المصابة بطول النظر .

وعندما يتقدم العمر بالبشر فإن عدسة العين عند معظمهم تصبح أقل مرونة ولا تعود العضلات الهدبية قادرة على التحكم فى تحدب العدسة ومن ثم على مقدرتها على تركيز صور الأجسام الموجودة عند النقطة البعيدة الطبيعية أو النقطة القريبة الطبيعية . ويقال عندئذ أن العين قد فقدت **القدرة على التكيف** . ويتيح استعمال نظارات مزدوجة البؤرة على النظر خلال عدسات مفرقة عند التطلع إلى الأمام مباشرة ، وخلال عدسات مجمعة عند النظر إلى أسفل . بل إن بعض الناس يستخدمون ثلاثة أنواع من العدسات مثبتة فى عدسة نظارة واحدة ، تسمى عدسة ثلاثية البؤرة . وتتيح هذه العدسات قدرة طيبة على إبصار أجسام على مسافات بعيدة أو متوسطة أو قريبة .

مثال 25-1

يستطيع رجل مصاب بطول النظر أن يقرأ الجريدة عندما يمسك بها على بعد 75 cm من عينيه فقط . ما هو البعد البؤرى المطلوب لعدسات نظارة القراءة لديه ؟ اعتبر أن المسافة بين النظارة وعينيه مهملة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى تمثله مسافة 75 cm ؟

الإجابة : إنها النقطة القريبة لعينيه أى أنه لا يستطيع التركيز على أجسام عند مسافة أقرب .

سؤال : ما الذى على العدسات التصحيحية فعله ؟

الإجابة : على العدسات أن تكوّن صورة تقديرية عند نقطته القريبة أى 75 cm بالنسبة لجسم موضوع على مسافة 25 cm من عينيه . وعندئذ تستطيع عيناه التكيف على التركيز على تلك الصورة .

سؤال : ما علاقة هذه البيانات بالبعد البؤرى لعدسات نظارة القراءة لديه ؟

الإجابة : هذه العلاقة تنظمها معادلة العدسة الرقيقة .

سؤال : ما هو بعد الجسم ؟ وما هو بعد الصورة ؟

الإجابة : طالما أهملنا المسافة بين العدسة التصحيحية والعين ، فإن بعد الجسم وبعد الصورة سيكونان 25 cm و 75 cm على الترتيب . وكل من الموضعين أمام العدسة .

سؤال : ما هى الإشارات الواجب اتخاذها لكل من p و i ؟

الإجابة : الجسم حقيقى ، ولهذا فإن $p = +25\ \text{cm}$. والصورة تقديرية ولذلك $i = -75\ \text{cm}$.

الحل والمناقشة : تنص معادلة العدسة الرقيقة على ما يلى :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{25\ \text{cm}} + \frac{1}{-75\ \text{cm}} = \frac{+2}{75\ \text{cm}}$$

$$f = +37.5\ \text{cm}$$

والبعد البؤرى الموجب هذا يشير إلى عدسة مجمعة . عليك إثبات أنه لو وضعت

العدسات التصحيحية عند 2 cm بالفعل أمام العينين ، فإن البعد البؤرة المطلوب سيكون $f = +33.6$ cm . **تلميح** : في هذه الحالة $p = +23$ cm و $i = -73$ cm .

تمرين : إذا كان البعد البؤرى لعدسات نظارتك $f = 60$ cm . فما هى النقطة القريبة لعينيك . **الإجابة** : 43 cm .

مثال 2-25

ما هو البعد البؤرى المطلوب لعدسة تصحيحية لسيدة نقطتها القريبة تساوى 75 cm ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو نوع عيب الإبصار الذى يصفه هذا المثال وما الذى على العدسات التصحيحية فعله ؟

الإجابة : إن النقطة البعيدة للعين الطبيعية هى مالانهاية . ولكن السيدة لا تستطيع رؤية الأشياء لأبعد من 75 cm . إنها تعانى من قصر نظر (ميوبيا) . وعندما تنظر إلى جسم بعيد فإن العدسات لابد أن تنتج صورة تقديرية لذلك الجسم عند نقطتها البعيدة .

سؤال : ما هى القيم الواجب علىّ اتخاذها لكل من p و i فى معادلة العدسة الرقيقة ؟

الإجابة : $p = +\infty$ و $i = -75$ cm .

الحل والمناقشة :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-75\ \text{cm}} = 0 - \frac{1}{75\ \text{cm}}$$

$$f = -75\ \text{cm} \qquad \text{(عدسة مفرقة)}$$

2-25 آلة التصوير (الكاميرا) البسيطة

تعمل آلة التصوير (فى الشكل 4-25) إلى حد كبير كالعين البشرية . فهى تستخدم عدسة تكون صورة لجسم ما على فيلم فوتوغرافى يقوم مقام الشبكية فى العين ـ بمعنى أن عدسة آلة التصوير تكون صورة حقيقية على الفيلم بنفس الطريقة التى تكون بها عدسة العين صورة حقيقية على الشبكية . وتكون الصورة مقلوبة على الفيلم ويرتبط حجمها I مع حجم الجسم O بالعلاقة المعتادة : $I/O = i/p$.

وخلافًا لما عليه العين فإن عدسة الكاميرا البسيطة ليست ذات بعد بؤرى متغير ولذلك ، وحتى تتكون بؤرة جيدة على الفيلم ، فلابد من تحريك العدسة إلى الخلف وإلى الأمام عند تغيير المسافة بين الكاميرا والجسم .



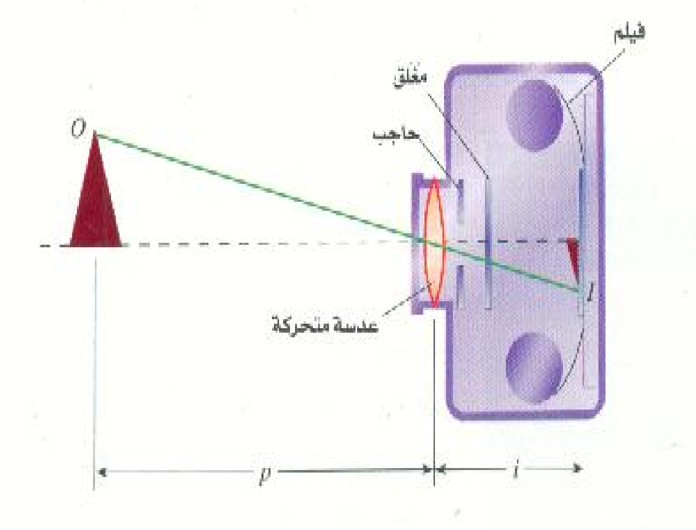
تتيح المنافيخ المرنة التى تثبت عليها كاميرات هذا الإستديو مدى كبيرًا من المسافات بين العدسة والفيلم ؛ وهذا ما يمكّن المصور من وضع العدسة بالقرب من جسم ما حتى يحصل على صور ذات تكبير ضخم . وتملأ الصورة فى هذه الكاميرا الخاصة لوحًا حساسًا مساحته 24 × 20 بوصة مربعة .

ويوجد بآلات التصوير غالية الثمن نظامًا معقدًا جدًا للعدسات بدلاً من عدسة واحدة ودرجة التعقيد هذه ضرورية إذا أردنا للكاميرا أن تلتقط صورًا حادة وبسرعات عالية

للمغلق . ومن الواضح سبب جدوى التقاط صور واضحة حادة ، أما السرعات العالية للمغلق فتتيح التقاط صور واضحة للأجسام المتحركة بسرعة ، فكل حركة للجسم من شأنها هز الصورة بقدر ما ، ولكن كلما قصر الزمن الذى يظل فيه مغلق الكاميرا مفتوحًا كلما انخفض اهتزاز الصورة . وحيث أن المغلق لابد أن يظل مفتوحًا لفترة كافية تسمح بقدر مناسب من الضوء أن يسقط على الفيلم ، فإن سرعات المغلق العالية تستوجب أن تكون العدسة كبيرة لكى تمر كمية كبيرة من الضوء خلال زمن قصير جدًا إلى داخل الكاميرا .

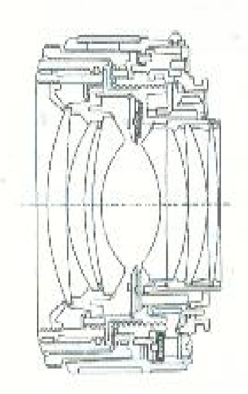
وكما رأينا فى القسم 11–23 فإن الجزء الأوسط من العدسة المكبرة فقط هو الذى يمكن استخدامه إذا كان المطلوب هو صورة واضحة . ويصبح هذا القيد أكثر أهمية إذا كان المطلوب من الكاميرا التقاط صور عن قرب ، لأن العدسة عندئذ لابد وأن تكون محدبة جدًا . ولا يمكن التخلص من أخطاء التركيز فى بؤرة والمصاحبة لعدسة منفردة إلا بعمل مجموعة معقدة من العدسات . وعندئذ يمكن القول بأنه قد تم تصحيح العدسة **لتلافى الزيغ** .

ويتسبب عيب آخر فى العدسات فى جعل أطراف الصور تكتسب ألوانًا مختلفة ويعرف هذا العيب باسم **الزيغ اللونى** . وينشأ هذا العيب من حقيقة أن سرعة الضوء فى الزجاج تختلف باختلاف الطول الموجى ، وعلى ذلك لا يكون معامل انكسار الزجاج هو نفسه لجميع الألوان . فالضوء الأزرق ينكسر بقوة أكبر داخل العدسة عن الضوء الأحمر . وهذا ما يجعل الألوان داخل حزمة ضوء عادى تنفصل عن بعضها . وللتغلب على هذا العيب فإن العدسة تتركب من طبقات مدمجة معًا من نوعين أو أكثر من الزجاج ويطلق



شكل 4–25:
منظر لكاميرا بسيطة . كيف تضبط الصورة فى بؤرة على الفيلم ؟





يتم تصميم عدسة الكاميرا الحديثة ذات الأداء المرتفع عن طريق حسابات معقدة بالكومبيوتر ، وتكون عبارة عن مجموعة من العديد من العدسات .

على العدسة التى تم التخلص جزئيًا من الزيغ الكرى بها **عدسة لالونية** . على أنه من المستحيل تخليص عدسة ما تمامًا من هذا العيب .

مثال 3-25

لديك كاميرا عدستها ذات بعد بؤرى مقداره 55 mm+ . وعندما يتحرك جسم منطلقًا من مكان بعيد جدًا إلى نقطة على بعد 25 cm أمام العدسة ، فكم ينبغى على العدسة أن تتحرك حتى تحتفظ بالصورة مركزة على الفيلم ؟ وهل ينبغى تحريك العدسة بعيدًا عن الفيلم أم نحوه ؟ (يمكنك اعتبار العدسة رقيقة) .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يستدل على المسافة التى ينبغى تحريك العدسة لها ؟

الإجابة : إن تلك المسافة هى الفرق بين مسافتى العدسة إلى الفيلم (أى بعدى الصورة) واللازمتين لتكوين صورتين مناظرتين لوضعى الجسم هذين .

سؤال : ما هى المسافة i بين العدسة والفيلم ، المطلوبة لتكوين هاتين الصورتين ؟

الإجابة : عند $p = \infty$ بالنسبة للجسم البعيد ، فإن $1/f = 0 + 1/i$ أو $i = f = 55$ mm . وبالنسبة لجسم على بعد 25 cm .

$$\frac{1}{55\ \text{mm}} = \frac{1}{250\ \text{mm}} + \frac{1}{i}$$

سؤال : هل هناك سبيل لتوقع ما إذا كانت العدسة سيتم تحريكها نحو الفيلم أم بعيدًا عنه ؟

الإجابة : حيث أن f ثابت ، فإن معادلة العدسة الرقيقة تنص على أنك إذا أنقصت p فلابد أن تزيد i والعكس بالعكس .

الحل والمناقشة : عندما يكون بعد الجسم 25 cm فإن المسافة بين العدسة والفيلم تكون :

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{55\ \text{mm}} - \frac{1}{250\ \text{mm}}$$

$$i = +70.5\ \text{cm}$$

ويبعد هذا $70.5 - 55 = 15.5$ mm عن العدسة عنه بالنسبة للجسم البعيد . أى أنه لابد من تحريك العدسة مسافة 15.5 mm بعيدًا عن الفيلم حتى تتكيف مع الجسم القريب .

3-25 العدسة المكبرة

تعتبر العدسة المكبرة من أبسط الأجهزة البصرية (الشكل 5-25) . إنها مجرد عدسة مجمعة ، وهى أحد أهم الأجزاء فى العديد من الأجهزة البصرية . وتتلخص وظيفتها فى تكوين صورة مكبرة لجسم صغير موضوع قريبًا من العين .

وبإمكاننا فهم كيفية عمل العدسة المكبرة إذا رجعنا إلى الشكل 6-25 ، فحجم

الصورة المتكونة على الشبكية يزداد كلما صار الجسم أقرب فأقرب من العين . على أن العين البشرية غير قادرة على التركيز جيدًا على أجسام أقرب من النقطة القريب . وإذا وضعنا عدسة مجمعة أمام العين ، كما في الشكل 7-25 فسنرى الصورة التقديرية التى تكونها . وحتى لو كان الجسم يقع أقرب من النقطة القريبة (أى من القرب بحيث لا يمكن رؤيته بوضوح) فإن الصورة ستتكون عند النقطة القريبة ، فتقوم العين باعتبار الصورة المكبرة على أنها الجسم . وعلى ذلك تكون الصورة التى تكونها عدسة العين على الشبكية هى نفس الصورة التى تنتج عن نسخة مكبرة من الجسم موضوعة عند النقطة القريبة . وهذه الصورة التى على الشبكية أكبر بكثير مما لو كان الجسم الحقيقى الصغيرة يشاهد بالعين المجردة ، ولذلك يتضح الكثير جدًا من التفاصيل .

وتستخدم طريقتان لقياس أثر التكبير فى هذه الحالة . فالتكبير الذى سبق أن عرفناه بالمعادلة 3-23 هو $M = I/O$ وهو ما يعرف **بالتكبير الخطى** ، وقد أثبتنا أنه مكافئ للنسبة $-i/p$ (المعادلة 3-23 (أ)) . ولكى نستعمل العدسة المكبرة فإننا نضع العين وراءها مباشرة ؛ ولنطلق على المسافة بين العدسة والنقطة القريبة للعين p_n . وكما هو واضح فى الشكل 7-25 فإن $i = -p_n$ عندما تكون الصورة التى كونتها العدسة عند النقطة القريبة . وعندئذ يكون لدينا

$$M = \frac{-i}{p} = -i\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{i}\right) = p_n\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{-p_n}\right) = \frac{p_n}{f} + 1 \qquad (25\text{-}1)$$

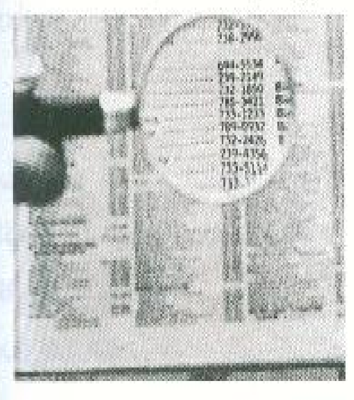
وقد استعنا بمعادلة العدسة للتعويض عن $1/f - 1/i$ بالكمية $1/p$.

وتنطوى الطريقة الثانية لوصف التكبير على استخدام كمية تسمى **التكبير الزاوى** وهو ما سنقوم بتعريفه بالرجوع إلى الشكل 8-25 . فنلاحظ عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة للعين ، كما فى الشكل 8-25 (أ) فإنه يقابل زاوية مقدارها ϕ عند العين . أما إذا وضع على مسافة أقل من بعد النقطة القريبة ثم نُظر إليه عبر العدسة المكبرة فإن الجسم سيقابل زاوية مقدارها ϕ' عند العين . وعندئذ نعرّف :

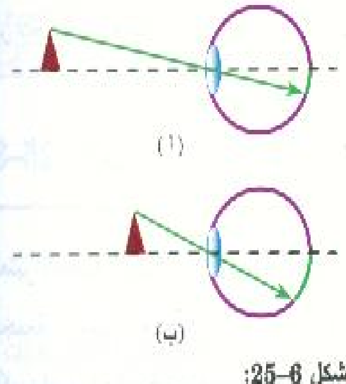
$$\text{التكبير الزاوى} = \frac{\phi'}{\phi} \qquad (25\text{-}2)$$



تستخدم العدسات المكبرة لكثير من الأغراض والأمثلة على ذلك تشمل (رتبت الأشياء باتجاه حركة عقارب الساعة من اليمين إلى أعلى) : عدسة مكبرة للقراءة ، عدسة تستخدم فى عد خيوط الأنسجة ، عدسة الجيولوجى وأخيرًا عدسة مكبرة لفحص الصورة المجسمة .

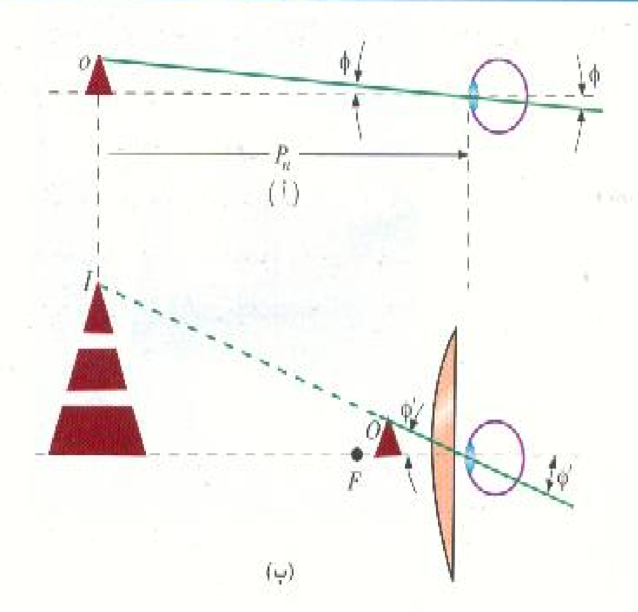


شكل 5-25:
لماذا كان الجزء المكبر فقط هو الذى يقع عند البؤرة بالنسبة للكاميرا التى التقطت هذه الصورة ؟



شكل 6-25:
عند اقتراب جسم من العين ، فإن الصورة التى تتكون على الشبكية تصير أكبر

شكل 7-25:
تتيح العدسة المكبرة للإنسان أن يضع الجسم الذى يراد فحصه عند نقطة أقرب كثيرًا من النقطة القريبة للعين ؛ وهذا من شأنه أن يكبر الصورة المتكونة على الشبكية .



شكل 8-25:
تتركز العين فى كلتا الطريقتين على النقطة القريبة . (أ) عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة فإن الزاوية التى تقابله عند العين (وعلى الشبكية) هى ϕ . (ب) وعندما يقع الجسم على مسافة أقرب من النقطة القريبة للعين فإن زاوية أكبر من ذلك هى التى تقابله(ϕ`) . ولأن الصورة التى كونتها العدسة المكبرة تقع عند النقطة القريبة ، فإن العين تراها بوضوح .

ولكى نحصل على معادلة للتكبير الزاوى فى الحالة الراهنة فإننا نرى بالرجوع إلى الشكل 8-25 أن :

$$\tan \phi = \frac{O}{p_n} \qquad و \qquad \tan \phi` = \frac{I}{p_n}$$

ولما كانت الزوايا التى تحدث فى مثل هذا المواقف صغيرة ، فإننا نستطيع أن نضع الزوايا نفسها مكان ظلها ، مما يعطى :

$$\text{التكبير الزاوى} = \frac{p_n}{p} = \frac{I}{O} = \frac{I / p_n}{O / p_n} = \frac{\phi`}{\phi}$$

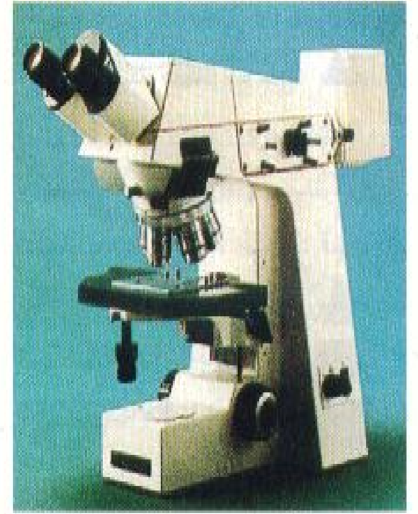
وهى معادلة شبيهة بالمعادلة 25-1 للتكبير الخطى :

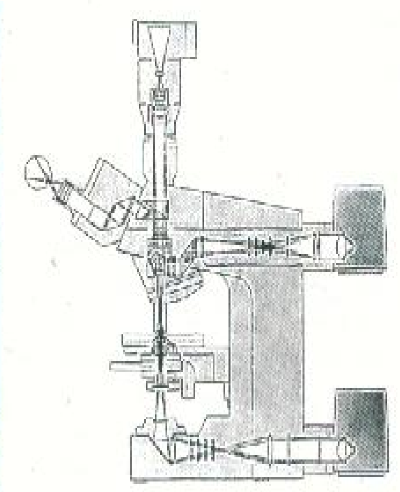
وكما نرى ، فالتعريفان يؤديان إلى نفس النتائج عند الظروف الراهنة . وغالبًا ما ترى الصورة من الناحية العملية عند مالانهاية بالعين المسترخية بدلاً من رؤيتها عند النقطة القريبة p_n ومن ثم $p = f$ ويصبح التكبير ببساطة هو

$$M = \frac{p_n}{f} \quad \text{(عند رؤية الصورة فى ما لا نهاية)} \qquad (25\text{-}1) \text{ (أ)}$$

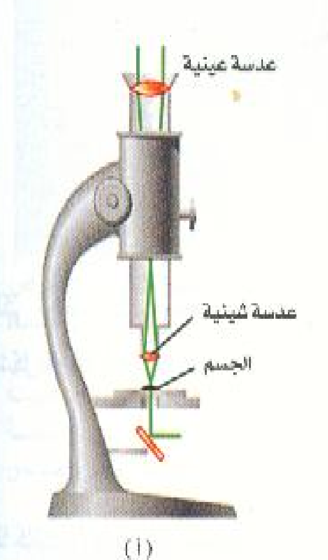
ويعتمد التكبير كما هو واضح على أسلوب استخدام العدسة المكبرة .

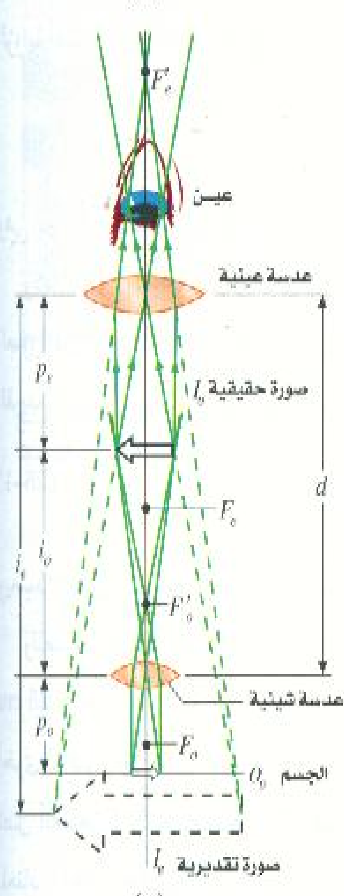
وللعدسة المكبرة النموذجية البسيطة عادة بعد بؤرى قيمته 5 أو 10 cm . وحيث أن $p_n = 25$ cm ، فإن مثل هذه العدسة المكبرة ستوفر تكبيرًا يتراوح بين 2.5 و 5 . وبعبارة أخرى ، فلو بقيت كل العوامل ثابتة ، فإن مثل هذه العدسة ستتيح لنا رؤية تفاصيل تصل أبعادها إلى نحو خمس (1/5) الحجم الذى تراه العين المجردة . على أنه ـ من المعتاد ـ أخذ العوامل الأخرى فى الاعتبار ؛ ومنها تشوش الصورة نتيجة الزيغ الكرى والزيغ اللونى للعدسة . وهناك أيضًا ـ كما رأينا فى القسم السابق ـ إنه حتى مع العدسات التامة النقاء ؛ يحد الحيود من درجة إدراك التفاصيل التى يمكن تحليلها .





ميكروسكوب حديث ذو عدستين عينيتين . ويلاحظ وجود برج دوار يسمح باختيار العدسات الشيئية المناسبة .





شكل 9-25:
تستخدم العدسة العينية فى الميكروسكوب المركب كعدسة مكبرة لرؤية الصورة الحقيقية التى كونتها العدسة الشيئية .

25-4 الميكروسكوب المركب

يؤدى الميكروسكوب المركب إلى تكبير أكبر مما توفره العدسة المكبرة ، نظرًا لأنه يتكون من عدستين تقوم كل منهما بتكبير الجسم (الشكل 9-25) . فالعدسة الأولى وتسمى **الشيئية** تنتج صورة حقيقية مكبرة I_0 للجسم الموضوع بالقرب منها على منصة الميكروسكوب . ولكى يتم هذا ، لابد أن تكون الشيئية مجمعة بقوة وذات بعد بؤرى قصير للغاية f_0 ، وغالبًا ما يبلغ عدة ملليمترات فحسب . أما العدسة الثانية وتسمى **العينية** فهى تعمل عمل عدسة مكبرة . وتقع الصورة I_0 التى تكونها العدسة الشيئية عند نقطة أقرب من f_e . وهو البعد البؤرى للعينية ، وتصبح من ثم هى الجسم بالنسبة للعدسة العينية . وهكذا تتكون صورة تقديرية مكبرة نهائية I_e عند النقطة القريبة للعين .

سنبحث الآن عن معادلة تعبر عن التكبير الخطى للميكروسكوب ، وسنبدأ بالتكبير الخطى للشيئية وسنرمز له بالرمز M_0 . وبدمج تعريف التكبير الخطى مع معادلة العدسة فإن :

$$M_0 = i_0 / p_0 = i_0\left(\frac{1}{f_0}-\frac{1}{i_0}\right) = \frac{i_0}{f_0}-1$$

أما بالنسبة لتكبير العدسة العينية M_e فيمكننا الاستعانة بالمعادلة 1-25 :

$$M_e = 1+\frac{p_n}{f_e} = 1+\frac{i_e}{f_e}$$

حيث p_n لها نفس المعنى السابق وهى أنها النقطة القريبة للعين .

والتكبير الكلى M للميكروسكوب هو حاصل ضرب تكبيرى العدستين . ومن ثم

$$M = M_0 M_e = \left(\frac{i_0}{f_0}-1\right)\left(1+\frac{p_n}{f_e}\right) \approx \frac{i_0 p_n}{f_0 f_e} \qquad (25\text{-}3)$$

والتقريب الأخير الذى أجريناه يمكن تبريره عندما يكون البعدان البؤريان صغيرين جـدًا وهـو ما يحدث فى العادة وتـكون i_0 عمليًا هـى طول جسم الميكروسكوب تقريبًا ($\approx 18\,cm$) أمـا $p_n = i_e$ وهى نحو $25\,cm$.

وكما نرى فإن f_0 و f_e لابد أن يكونا أصغر ما يمكن للحصول على أكبر تكبير ممكن . ولكى يتم هذا دون تشويه خطير نتيجـة صـور الزيـغ المختلفة للعدسـات فـإن مجموعـة مركبة ومصممة بعناية من العدسات لابـد مـن اسـتخدامها بـدلاً مـن العدسـات البسـيطة المبينة فى الشكل 9–25 والمستخدمة كعدسات شيئية وعينية . وعندئذ تكون الأبعاد البؤرية المستخدمة فى المعادلة 3–25 هى الأبعاد البؤرية المكافئة للعدسـات المركبة .

مثال 4-25

البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى ميكروسكوب مركب يبلغ $5\,mm$ ، أما عدسـته العينيـة فبعدها البؤرى $30\,mm$ ، وكانت المسافة بين العدسة الشيئية والعينية $230\,mm$. فإذا كان المطلوب أن تتكون الصورة النهائية عند النقطة القريبة للعين العادية ، فـأين يجـب وضع الجسم ؟ ما هو التكبير الخطى للجسم ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين أوضاع الصورة النهائية والجسم الأصلى ؟

الإجابة : تكوِّن العدسة الشيئية صـورة I_0 للجسم ، تُتخـذ بعـد ذلـك كجسم للعدسـة العينية . وتنطبق معادلة العدسة على كل من العدستين .

سؤال : ما هى الكميات المعروفة من كميات معادلة العدسة ؟

الإجابة : بالنسبة للعدسـة الشيئية فإن $f_0 = +5\,mm$ أمـا p_n و i_0 فـهى غـير معلومـة وبالنسبة للعدسة العينية فإن $f_0 = +30\,mm$ و $i_e = -250\,mm$ (لابـد أن تكـون قـادرًا على معرفة السبب فى أن i_e سالب) . وقد أصبـح الآن لديـك مـا يكفـى مـن المعلومـات لإيجاد p_e .

سؤال : إذا علمت قيمة p_e فكيف أربطها بموضع العدسة الشيئية ؟

الإجابة : يمكنك بمراجعة الشكل 9–25 (ب) أن تعرف أن المسافة d بين العدسـتين هـى $d = p_e + i_0$ ؛ وهذا يعطيك قيمة i_0 وبدورها تتيح معرفة p_0 من معادلة العدسة الشيئية .

سؤال : وهل يكون لدى عندئذ ما يكفى من المعلومات لحساب التكبير الخطى ؟

الإجابة : نعم . فكل المقادير الواردة بالمعادلة 3–25 قـد أصبحت معلومـة ، مـع إدراكك بأن $p_n = i_e = 250\,mm$.

الحل والمناقشة : معادلة العدسـة العينية هى :

$$\frac{1}{p_e} = \frac{1}{30\,mm} - \frac{1}{-250\,mm} = \frac{25+3}{750\,mm}$$

ومن ثم $p_e = 26.8\,mm$. وبوضع $d = 230\,mm$ فإن $i_0 = 230\,mm - 26.8\,mm$

$i_0 = 203$ mm ، ومعادلة العدسة الشيئية :

$$\frac{1}{p_o} = \frac{1}{5\ \text{mm}} - \frac{1}{203\ \text{mm}} = \frac{203-5}{1015\ \text{mm}}$$

$$p_o = 5.13\ \text{mm}$$

وهذا الموقع عند نقطة أبعد من النقطة البؤرية للعدسة الشيئية . ويكون التكبير هو :

$$M = \frac{i_0 p_n}{f_0 f_e} = \frac{(203\ \text{mm})(250\ \text{mm})}{(5\ \text{mm})(30\ \text{mm})} = 340$$

25-5 التلسكوب الفلكي

الغرض من التليسكوب ـ خلافًا للميكروسكوب ـ هو تكبير الأشياء البعيدة جدًا . وينطبق هذا على التليسكوبات الفلكية حيث تنتشر الأجرام التي ندرسها في الكون بأكمله . ويحتاج الفلكيون للتليسكوب لتكون لديهم القدرة على ما هو مختلف عن مجرد تكوين صورة مكبرة ولابد للتليسكوب الجيد أن (1) يجمع ما يكفي من الضوء الصادر عن مصادر خافتة ، لتكوين صورة ساطعة و (2) يحلل أكثر ما يمكن من التفاصيل في الصورة .

وأهم عنصر في التليسكوب هو العدسة أو المرآة الأولية أو الشيئية التي تجمع الضوء من جسم بعيد تم تكوّن صورة له . وحيث أن المسافة إلى الجسم لانهائية فالصورة تتكون عند مسافة f_0 من العدسة الشيئية .

والتليسكوبات التي تستخدم عدسة شيئية تسمى تليسكوبات **كاسرة** ؛ أما التي تستخدم مرايا منحنية تقوم بدور الشيئية فتسمى تليسكوبات **عاكسة** . ومعروف أن بناء مرايا ضخمة أرخص وأيسر كثيرًا من بناء عدسات ضخمة . فالمرايا يمكن جعلها خفيفة الوزن ، كما أنها لا تحتاج سوى لسطح مصقول بدقة . ولهذا السبب صارت كل التليسكوبات الحديثة الضخمة تليسكوبات عاكسة . ومن بين أكبر تلك التليسكوبات ذلك المعروف بتليسكوب هيل على جبل بالومار بكاليفورنيا وآخر موجود في أوكرانيا ولها مرايا شيئية أقطارها على الترتيب 5 m و 6 m . على أن أكبر تليسكوب كاسر هو ذلك الذي يبلغ قطر عدسته 1 m وهو موجود في مرصد بيركيز في خليج ويليامز بولاية ويسكونسن وقد بني منذ قرن مضى تقريبًا .

وقد تستخدم التليسكوبات للرؤية المباشرة ، حيث تستخدم عدسة عينية لتكبير ورؤية الصورة التي تكونها الشيئية مثلما يحدث في الميكروسكوب . على أن الرؤية عادة ما تتم بشكل مباشر في التليسكوبات الصغيرة فحسب وللاستعمال العابر . أم التليسكوبات المستخدمة في الأبحاث فهي غالبًا ما تستعمل بدون وجود عدسة عينية ، إذ إنها تعمل بالضبط مثل كاميرات ضخمة ، حيث تقوم العدسات أو المرايا الشيئية بتكوين صورة على لوح فوتوغرافي أو أجهزة إحساس إلكترونية .

دعنا الآن نبحث في معايير أداء التليسكوبات الفلكية بشيء من التفصيل . وعلى

الرغم من أننا سوف نستعمل رسم مسارات الأشعة في العدسات ، إلا أن كل ما سنحصل عليه من نتائج سيكون صالحاً للتطبيق على التليسكوبات العاكسة أيضاً .

إن حجم أو **مقياس** الصورة التي كونتها الشيئية ، يتناسب مع بعدها البؤري f_0 . ويمكننا ـ من الشكل 4-25 ـ أن نرى أنه في حالة الكاميرا تقابل العدسة نفس الزاوية ϕ بالنسبة لكل من الجسم والصورة . ولذلك يكون حجم الصورة على الفيلم $I = i \tan \phi$. وبالنسبة للمصادر الفلكية فإن $p_0 = \infty$ ، $i_0 = f_0$ و $\tan \phi \approx \phi$ حيث ϕ هي الزاوية المقاسة بالتقدير الدائري . ومن هذا يمكننا اشتقاق معادلة لحجم الصورة :

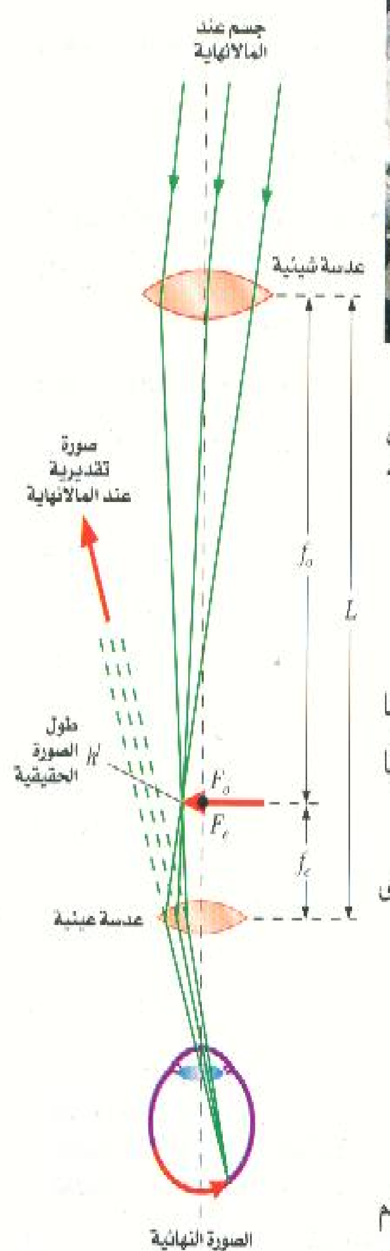


(أ)



(ب)

(أ) تليسكوب شخصي نموذجي صغير يستخدم في الرؤية العابرة . (ب) التليسكوب « مايول » الذي يزن 375 طنا وهو مثبت في مرصد كيت بيك القومي . ويحتفظ بمرآته الشيئية التي يبلغ قطرها 4 m تحت غطاء واق عند قاع الصورة .



شكل 10-25:
تليسكوب فلكي مجهز بعدسة عينية . لاحظ الفرق بين هذا التليسكوب والميكروسكوب المبين في الشكل 9-25 .

$$I_0 = 0.0175\ \phi \qquad (25\text{-}4)$$

حيث استخدمنا معامل التحويل من قيم ϕ بالتقدير الدائري إلى قيمها بالدرجات .

وتتناسب درجة **سطوع** الصورة B مع مساحة فتحة الشيئية ، والتي تتناسب بدورها مع مربع قطر الشيئية d ، كما تتناسب B أيضاً مع مربع البعد البؤري f_0 عكسياً أي أن $B \sim (d / f_0)^2$.

ومعيار الأداء الثالث هو مقدرة التليسكوب على تحليل التفاصيل الدقيقة . وفي النهاية فهي حدود الحيود التي تعطيها المعادلة 7-25 :

$$\sin \theta \approx \theta = \frac{1.22\lambda}{d}$$

وإذا كانت كل من λ و d مقاستين بنفس الوحدات فإن θ ستكون بالتقدير الدائري .

ونستطيع الآن تلخيص المعايير الثلاثة كما يلي :

1 يعطي البعد البؤري الطويل للشيئية صورة كبيرة ذات سطوع منخفض نسبياً فإذا لم يكن السطوع مهماً مثلما هو الحال في التليسكوب الشمسي المخصص لتصوير الشمس فيمكننا تحمل الحصول على صورة كبيرة من غير أن نهتم بمقدرتنا على رؤيتها .

2 تستفيد كل من درجة السطوع ودرجة التحليل (التفريق) من كون قطر الشيئية أو الفتحة كبير . وإذا تم الحصول على تفريق ممتاز فإن حجم الصورة يصبح أمراً ثانوياً وهكذا يكون القطر الكبير للشيئية هو أهم عامل في تحديد أداء التليسكوب .

ويوضح الشكل 10-25 كيفية استخدام التليسكوب في وجود عينية . فالعدسة الشيئية تكوِّن صورة حقيقية لجسم لا نهائي البعد وعلى مسافة f_0 وراء العدسة الشيئية والبعد البؤرى f_0 للشيئية أكبر بكثير من مثيله في الميكروسكوب . كما توضع عدسة عينية تعمل كعدسة مكبرة بحيث تنطبق بؤرتها F_e بالضرورة مع F_0 . ويكون البعد البؤرى f_e للعينية أقصر بكثير من f_0 . ولذلك فإن العينية ستكوِّن صورة تقديرية نهائية للجسم عند مالانهاية . وترى العين المسترخية عندئذ الصورة المكبرة .

نستطيع الآن ، اشتقاق معادلة التكبير الزاوى لتليسكوب مجهز بعينية بمساعدة الشكل 11-25 . والزاوية ϕ التى يقابلها الجسم البعيد عند الشيئية هى نفس الزاوية التى تقابلها الصورة I_0 عند الشيئية . وهذه العلاقة تؤدى إلى :

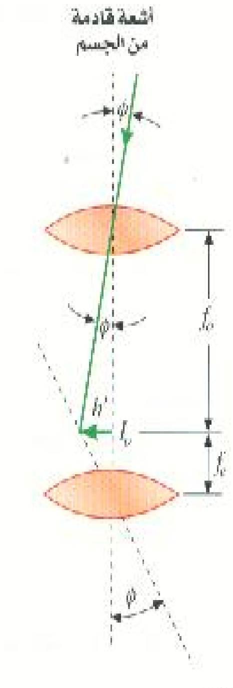
$$\tan \phi \approx \phi = \frac{I_0}{f_e}$$

أما الزاوية المكبرة `ϕ التى تراها العين فتعطى بالمعادلة :

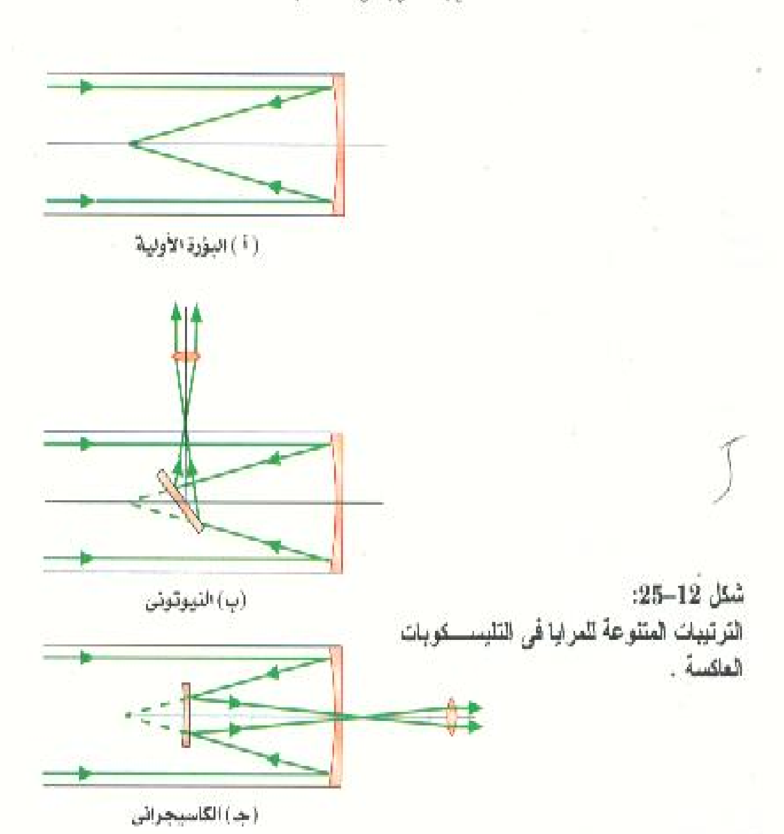
$$\tan \phi` \approx \phi` = \frac{I_0}{f_e}$$

والنسبة بين هاتين المعادلتين هى

$$M_\phi = \frac{\phi`}{\phi} = \frac{I_0 / f_e}{I_0 / f_0} = \frac{f_0}{f_e} \qquad (25-5)$$



شكل 11-25:
يكبر التليسكوب الزاوية المقابلة للأجسام البعيدة جدا .



شكل 12-25:
الترتيبات المتنوعة للمرايا فى التليسكوبات العاكسة .

إذا كانت المرايا تعكس الضوء ليرتد على طول محور التليسكوب ، فقد ابتكر الفلكيون طرقًا عديدة لتوجيه الضوء بواسطة عواكس نحو البقعة المناسبة . ويوضح الشكل 12-25

بعضا من هذه الطرق . ويستوعب أكبر التليسكوبات أجهزة كثيرة بل ويستوعب حتى الفلكي نفسه عند بؤرة العدسة الشيئية تمامًا (وهي المسماة بالبؤرة الأولية) داخل التليسكوب كما في الشكل 12-25 (أ) .

أما البديل الثاني فهو الترتيب **النيوتوني** ، والذى استخدمه لأول مرة إسحق نيوتن ، وهو مناسب للتليسكوبات الأصغر بوجه خاص . ويستخدم في هذا التصميم (الشكل 12-25 (ب)) مرآة صغيرة مستوية مثبتة قطريًا على محور التليسكوب بحيث تكون أقرب إلى الشيئية منها إلى البؤرة الأولية . وتقطع هذه المرآة الأشعة القادمة من الشيئية قبل وصولها إلى البؤرة الأولية ، ثم تقوم بحرفها عموديًا على محور التليسكوب . ثم تمر الأشعة عبر ثقب صغير لتصل إلى بؤرة كما هو موضح عند جانب التليسكوب . وحيث أن معظم مساحة المرآة الشيئية ، ومن ثم معظم الضوء الذى تجمعه ، يتضمن الأجزاء الخارجية للمرآة ، فإن المرآة الثانوية الموضوعة مركزيًا لن تقطع سوى قليل من الضوء .

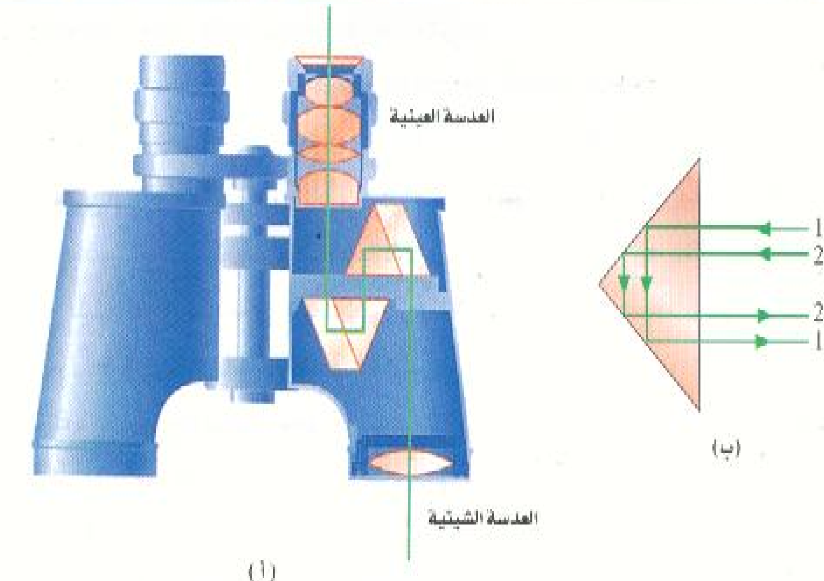
يوضح الشكل 12-25 (جـ) ترتيبًا آخر للمرآة ، يسمى الكاسيجراني ، حيث توجد به مرآة ثانوية محدبة تعيد توجيه الضوء لينتقل على طول محور التليسكوب حتى ينفذ من ثقب مركزى في المرآة الشيئية . وتتكون الصورة خلف فتحة الخروج هذه مباشرة وهكذا نرى أن هذا الترتيب يطيل البعد البؤرى للشيئية وذلك « بثنيه » لمسار الضوء ومن شأن هذا أن يقلل من الطول الفيزيائى للتليسكوب مع الاحتفاظ بميزة وجود شيئية ذات بعد بؤرى طويل .

لقد عرفنا أن كلاً من التحليل (التفريق) والقدرة على جمع الضوء يزيدان عند جعل قطر الشيئية كبيرًا جدًا . على أن هذا ـ لو حدث ـ لأصبح الزيغ الكرى خطيرًا لأن كثيرًا من الضوء سينعكس من أجزاء المرآة البعيدة عن المحور . وللقضاء على هذه المشكلة فإن معظم المرايا الشيئية الضخمة تتم صناعتها بمقطع مستعرض على هيئة قطع مكافئ بدلاً من المقطع الكرى . فالأسطح التى على هيئة قطع مكافئ تقوم بتركيز الأشعة المتوازية في البؤرة بدقة ، حتى لو سقطت تلك الأشعة بعيدًا عن المحور المركزى .

ومع أن **النظارات المعظمة (ذات العينيتين)** لا تستخدم للرصد الفلكى إلا في الحالات العابرة جدًا إلا أنها عبارة عن تليسكوبين متجاورين (الشكل 13-25) ، مما يتيح للمشاهد أن يرى صورًا مكبرة مع إدراك العمق الذى يوفره استعمال العينين . كما أن المنشورات الموجود بين العدستين الشيئيتين والعدستين العينيتين هى التى تقوم بقلب الصورة من خلال الانعكاس الداخلي الكلي كما هو مبين في الشكل 13-25 (ب) . ويعادل هذا الانقلاب من التغيرات التى تسببها الشيئية بحيث يتحول الأعلى إلى أسفل واليمين إلى اليسار . ونتيجة لذلك فإن المشاهد يرى صورة مكبرة تحتفظ بنفس اتجاه الجسم الأصلى .

مثال توضيحي 1-25

يقابل البدر زاوية مقدارها $0.5°$ عند راصد على الأرض ، والبعد البؤرى لشيئية في



شكل 13-25:
النظارة المعظمة (ذات العينيتين) ذات المنشور .

تليسكوب « هيل » على جبل بالومار هو 16.8 m . ما هو قطر صورة البدر عند البؤرة الأولية لهذا التليسكوب ؟ قارن هذه النتيجة مع حجم صورة القمر التي قد تحصل عليها باستعمال آلة تصوير لها عدسة ذات بعد بؤرى مقداره 50 mm .

استدلال منطقى : تعطينا المعادلة 4-25 حجم الصورة عند بعد بؤرى معين وزاوية مقابلة معينة . وبالنسبة لتليسكوب هيل فإن :

$$I = 0.0175\, f_0\, \phi = 0.0175\,(16.8\text{ m})(0.5^\circ) = 0.147\text{ m}$$

$$= 14.7\text{ cm}$$

وبالنسبة للكاميرا :

$$I = 0.0175(50\text{ mm})(0.5^\circ) = 0.44\text{ mm}$$

أي أن القمر سيبدو كنقطة لا يزيد عرضها عن نصف ملليمتر على الفيلم !





مطياف (إسبكترومتر) ذو منشور . ويرى المنشور على المنصة التي في المركز . يدخل الضوء عبر فتحة الذراع الثابتة الواقعة إلى أعلى يسارًا ، ثم يتفرق عبر المنشور بحيث ترى صورة متعددة للفتحة . واحدة عند كل طول موجي يحتوى عليه مصدر الضوء المستخدم ـ بواسطة تليسكوب صغير مثبت بالذراع التي إلى اليمين . وهي ذراع قابلة للتحريك ، ويمكن قراءة الزاوية المحصورة بينها وبين الذراع الثابتة من خلال العدسة المكبرة الصغيرة (الدائرة السوداء) الموجودة أعلى غلاف المطياف .

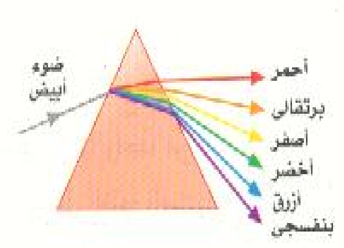
25-6 المطياف (الإسبكترومتر) ذو المنشور

يستعمل المنشور - الذي يصنع عادة من الزجاج في فصل الضوء إلى الألوان المختلفة . وعادة ما تنحني حزمة الضوء مرتين إذا مرت من منشور ، مرة عند دخولها والأخرى عند خروجها . ونطلق على الزاوية الكلية التي ينحني بها الشعاع **زاوية الانحراف** وهي التي يرمز لها بالحرف D في الشكل 14-25 .

شكل 14-25:
يحرف المنشور حزمة الضوء بزاوية مقدارها D .

ويمكننا حساب الزاوية D باستعمال قانون سنل إذا علمت كل من زاوية السقوط وزوايا المنشور ومعامل انكسار الزجاج . وكلما كان معامل انكسار الزجاج كبيرًا كلما زاد انحراف الحزمة . ولهذا الأمر نتائج مهمة كما سنرى لاحقاً .

لقد ذكرنا في القسم 9-23 أن سرعة الضوء في معظم المواد تتغير بتغير الطول الموجي . وهذا يكافئ قولنا أن معامل انكسار المادة يعتمد على لون الضوء . ومعامل انكسار الضوء البنفسجي بالنسبة لكثير من المواد أكبر من نظيره للضوء الأحمر . ويعني هذا أن الضوء البنفسجي ينحني بشكل أكبر داخل المنشور عن الضوء الأحمر . ومن ثم ، إذا دخلت حزمة ضوء أبيض في منشور ، كما في الشكل 15-25 فإن الضوء يتفرق إلى ألوانه .



شكل 15-25:
ليست زاوية الانحراف بواسطة المنشور ثابتة لجميع الأطوال الموجية التي يحتويها الضوء ولذلك يفرق المنشور الضوء الأبيض إلى الألوان المكونة له .

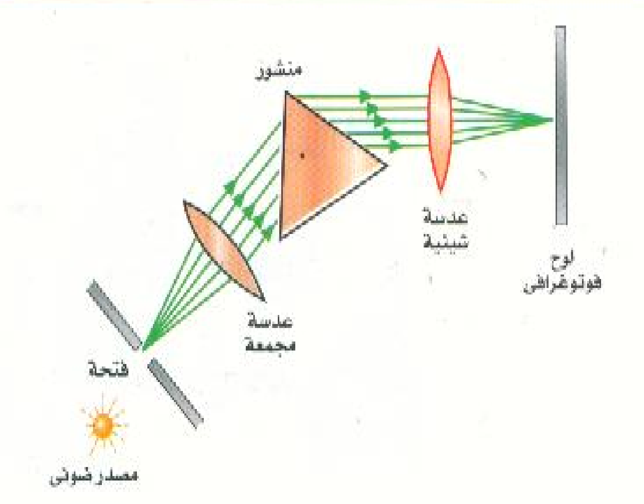
وتسمى مقدرة وسط ما على تفريق الضوء أو تشتيته **بتفريق الوسط** ، وهي كمية تعتمد على المدى الذي يتغير فيه معامل الانكسار مع الطول الموجي . ويتغير التفريق من مادة إلى أخرى كما يوضح الجدول 1-25 . وتتغير هذه الخاصية في زجاج فلنت ، الذي يعتبر مثالاً على الوسط ذي التفريق المرتفع - بحيث يتغير معامل انكساره بما يزيد قليلا عن 3 بالمائة على امتداد الطيف المرئي .

الجدول 1-25 :

تغير معامل الانكسار مع الطول الموجي (التفريق) بالنسبة للزجاج والكوارتز .

كوارتز منصهر	زجاج فلنت	زجاج كراون	اللون	λ(nm)
———	1.705	1.539	فوق البنفسجي	360
1.467	1.675	1.528	بنفسجي	434
1.463	1.664	1.523	أزرق مخضر	486
1.458	1.650	1.517	أصفر	589
1.456	1.644	1.514	أحمر	656

إن خاصية التفريق لدى المنشورات على قدر كبير من الأهمية في البحوث العلمية وفي التطبيقات الصناعية . وحيث أن كل ذرة وجزئ يمكن استثارتها لكي تبعث الطول الموجي الخاص بها من الإشعاع الكهرومغناطيسي ، فإن الأطوال الموجية المنبعثة من مادة ما تساعدنا على تحديد هوية المادة . والجهاز الذي يستعمل منشورًا في تفريق حزمة ضوء إلى الأطوال الموجية التي تكونها ، يسمى مطيافاً (**إسبكترومتر أو إسبكتروسكوب**) والمطياف ذو المنشور البسيط والمرسوم في الشكل 16-25 هو المستعمل لتحليل الأطوال

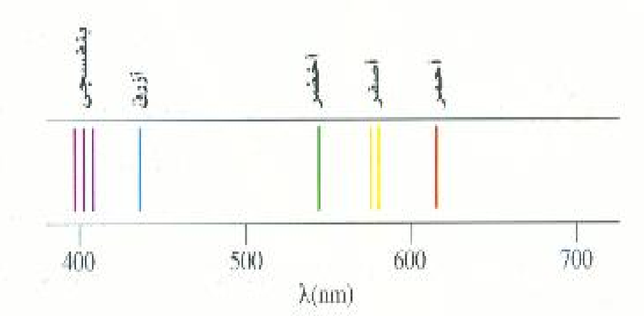


شكل 16-25:
تتكون صورة للفتحة على اللوح الفوتوغرافى للمطياف ذى المنشور . فإذا كان الضوء يحتوى على أكثر من طول موجى واحد ، فإن صورًا عديدة ستظهر على اللوح الفوتوغرافى .

الموجية المنبعثة من مصدر ضوئى . سنفترض الآن أن المصدر يبعث طولاً موجيًا منفردًا . (تبعث مصابيح بخار الصوديوم المستعملة بالطرق والشوارع بضوئها الأصفر المميز ، طولاً موجيًا مرئيًا واحدًا هو 589 nm) .

يدخل الضوء الصادر من المصدر إلى المطياف عبر فتحة ضيقة موضوعة عند النقطة البؤرية للعدسة المجمعة . وحيث أن هذه الفتحة تعمل كجسم موضوع عند هذه النقطة البؤرية فإن الضوء الخارج من العدسة سيكون متوازيًا . وبما أن الطول الموجى ثابت لجميع الأشعة ، لذا فهى تنحرف بنفس الزاوية بواسطة المنشور وتخرج منه جميعها متوازية معًا ، فإذا عبرت العدسة الشيئية فإنها تتجمع فى بؤرة تقع على مسافة البعد البؤرى لتلك العدسة حيث تتكون صورة للجسم الذى بعثها . وهو فى هذه الحالة - الفتحة - إذا ما وضعنا لوحًا فوتوغرافيًا أو فيلمًا عند بؤرة الشيئية ، فإن صورة الفتحة ستظهر على هيئة أحد خطوط الطيف على اللوح أو الفيلم .

يبعث كل نوع من المصادر الضوئية بالأطوال الموجية المميزة له ، ونحن نعرف ما يدور داخل التركيب الذرى والجزيئى من دراسة تلك الأطوال الموجية . (الفصل السابع والعشرون) . وعندما يستخدم مصباح بخار الزئبق (المصابيح ذات اللون المائل للزرقة والمستعمل لإضاءة الساحات) . كمصدر الضوء للمطياف ، فإن عدة خطوط طيفية تظهر على اللوح الفوتوغرافى ، كما هو موضح فى الشكل 17-25 (أ) ، حيث يمثل كل خط طولاً موجيًا فى طيف الضوء المنبعث من ذرات الزئبق . ولكل نوع من ذرات العناصر الكيميائية طيف ينفرد به ذلك العنصر . وتعتبر هذه الأطياف المنفردة بمثابة « بصمات الأصابع » المستخدمة لتحديد كل عنصر . وعلى ذلك ، يكون فحص الأطوال الموجية



شكل 17-25:
عندما يستخدم مطياف فى تصوير فتحة مضاءة بواسطة قوس زئبقى ، فإن عدة صور للفتحة (أو خطوط الطيف) ستظهر على الصورة الفوتوغرافية .

ومعرفة أيها موجود فى الطيف الذى يحدثه مصدر مجهول التركيب ، كفيلاً بتحديد العناصر المكونة للمصدر .

مثال توضيحى 25-2

افترض أن حزمة ضوئية فى الهواء قد سقطت بزاوية مقدارها $30°$ بالنسبة للعمود على لوح من زجاج فلنت . ما هى الزاوية المحصورة بين الأشعة المنكسرة ذات الطول الموجى 434 nm وذات الطول الموجى 565 nm ؟ يمكنك الرجوع إلى البيانات الواردة فى الجدول 25-1 .

استدلال منطقى :

يعطينا قانون سنل اتجاه الأشعة المنكسرة :

$$n \sin \theta_r = \sin \theta_i \qquad \text{أو} \qquad \theta_r = \sin^{-1} \frac{\sin \theta_i}{n}$$

وفى كلتا الحالتين ، $\theta_i = 30°$ بحيث أن $\sin \theta_i = 0.500$. بالنسبة للطول الموجى $\lambda = 434$ nm ، فإن $n = 1.675$ مما يؤدى إلى :

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{0.500}{1.675} = 17.37°$$

وبالنسبة للطول الموجى $\lambda = 656$ nm ، فإن $n = 1.644$ مما يعطى :

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{0.500}{1.644} = 17.71°$$

وهكذا ، فإن هذين اللونين يتفرقان عند عبورهما الزجاج بزاوية مقدارها :

$$17.71 - 17.37 = 0.34° \ \blacksquare$$

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) قصر النظر (الميوبيا) وطول النظر (هيبروبيا) ، (ب) النقطة القريبة والنقطة البعيدة ، (جـ) الزيغ الكرى ، (د) الزيغ اللونى ، (هـ) التكبير الخطى والزاوى ، (و) قوة التكبير ، (ز) التحليل (التفريق) ، (ح) السطوع ، (ط) مقياس الصورة ؛ (ى) التفرق ؛ (ك) الخط الطيفى .

2 أن ترسم الأجزاء المهمة للعين وأن تشرح وظيفة كل جزء .

3 أن تشرح كيف تقوم العدسات التصحيحية بعلاج قصر النظر وطول النظر . أن تحسب البعد البؤرى لعدسة تصحيحية مطلوبة إذا علمت كلاً من النقطة القريبة أو البعيدة الفعلية لعين مصابة .

4 أن تشرح عمل العدسة المكبرة البسيطة وتحسب تكبيرها .

5 أن تبين كيفية عمل الميكروسكوب المركب عن طريق رسم مواقع عدساته الشيئية والعينية وموقع الجسم . وأن ترسم مسار الشعاع لتحديد موقع الصورة .

6 أن ترسم المنظومة البصرية لتلسكوب فلكي وتحدد موقع الصورة التي يكونها .

7 أن تشرح كيف تكوّن النظارة المعظّمة - ذات العينيتين - صورة لها نفس اتجاه الجسم .

8 أن تحسب قوة تكبير ميكروسكوب مركب وتليسكوب فلكي ، إذا كان لديك البعد البؤري لكل من الشيئية والعينية .

9 أن تحسب حجم الصورة وحد التفريق في تليسكوب فلكي ، إذا أعطيت البعد البؤري وقطر عدسته الشيئية .

10 أن تشرح كيف يكوّن المطياف ذو المنشور طيفًا خطيًا . وتصف كيف يقوم بفصل الأطوال الموجية ، وكيف يتم استخدامه لتحليل حزمة ضوئية .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

النقط القريبة والبعيدة للعين

النقطة القريبة هي أقرب نقطة يمكن وضع الجسم عندها وتقع صورته على الشبكية عندما تكون العين في أقصى حالات التكيف . وتقع في الحالة الطبيعية عند 25 cm . والنقطة البعيدة هي أبعد نقطة يمكن وضع الجسم عندها وتقع صورته على الشبكية عندما تكون العين في أقصى حالات الاسترخاء . وتقع في الحالة الطبيعية في مالانهاية .

قطر النظر (الميوبيا) وطول النظر (هيبروبيا)

الميوبيا أو قصر النظر هي الحالة التي تكون فيها النقطة البعيدة للعين أقل من مالانهاية والهيروبيا أو طول النظر هي الحالة التي تكون فيها النقطة القريبة للعين أكبر من 25 cm الطبيعية .

الكاميرا البسيطة

الكاميرا البسيطة نظام يحتوي على عدسة واحدة . وهذه العدسة يمكن تحريكها نحو المستوى البؤري أو بعيدًا عنه (حيث الفيلم) لكي تتكيف مع المسافات المختلفة للجسم .

العدسة المكبرة البسيطة

العدسة المكبرة البسيطة هي عدسة مجمعة تستخدم لتكوين صورة تقديرية لجسم قريب من العين . وتقع الصورة عادة عند النقطة القريبة أو البعيدة للعين .

الميكروسكوب المركب

يعتبر الميكروسكوب المركب بمثابة منظومة ذات عدستين ، ويستخدم لتكبير أجسام موضوعة قريبًا جدًا من العدسة الشيئية . والعدسة الشيئية عبارة عن عدسة مجمعة ذات بعد بؤري قصير وتقوم بتكوين صورة حقيقية قريبة من العدسة العينية التي هي مجرد عدسة مكبرة بسيطة .

التليسكوب الفلكي

يتكون التليسكوب الفلكي من عدسة أو مرآة مجمعة ذات بعد بؤري طويل (تسمى الشيئية) تقوم بتكوين صورة حقيقية لجسم بعيدًا جدًا عن بؤرتها .

وعندما يستعمل التليسكوب للرؤية المباشرة فإن عدسة عينية ذات بعد بؤري قصير تستخدم كعدسة مكبرة بسيطة لرؤية الصورة التي كونتها الشيئية .

التكبير الزاوى (M_ϕ)

هو النسبة بين الزاوية `ϕ المقابلة للعين من جانب الصورة التى كونها جهاز بصرى ، والزاوية ϕ التى تقابل العين المجردة من جانب الجسم نفسه .

بالنسبة **للكاميرا البسيطة** : $M_\phi = 1$

للعدسة المكبرة البسيطة : $M_\phi = 1 + \frac{p_n}{f}$ (الصورة عند النقطة القريبة)

$M_\phi = \frac{p_n}{f}$ (الصورة عند مالانهاية)

للتليسكوب الفلكي (عند استعمال عينيه) : $M_\phi = \frac{f_0}{f_e}$

التكبير الخطى (M)

هو النسبة بين ارتفاع الصورة النهائية التى يكونها جهاز بصرى إلى ارتفاع الجسم .

بالنسبة : **لعدسة مكبرة بسيطة** : $M = M_\phi$

لميكروسكوب مركب : $M = \frac{i_0 p_n}{f_0 f_e}$

مقياس أو حجم الصورة (I)

مقياس الصورة فى كاميرا أو تلسيكوب هو البعد الخطى I لصورة جسم يقابل زاوية ϕ عند الشيئية .

$$I = 0.0175\, f_0 \phi$$

حيث f_0 هو البعد البؤرى للشيئية و ϕ هى الزاوية المقابلة مقاسة بالدرجات .

سطوع الصورة (B)

يتناسب سطوع صورة كونتها عدسة أو مرآة شيئية مع مربع النسبة بين قطر الشيئية D والبعد البؤرى للشيئية f_0 .

$$B \propto \left(\frac{D}{f_0}\right)^2$$

التفريق أو التحليل الزاوى

هو أقل زاوية يمكن أن يصل إليها التفريق بواسطة عدسة مثالية شيئية ، ويعطى بحد الحيود الذى نوقش فى الفصل الرابع والعشرين . ونعيده هنا مرة أخرى بغرض إكمال الموضوع .

$$\theta_m = 1.22\, \frac{\lambda}{D}$$

حيث D هو قطر الشيئية .

المطياف (أسبكترومتر) ذو المنشور

يستخدم المطياف ذو المنشور ظاهرة التفريق لفصل الضوء إلى أطوال موجية مختلفة . ويتكون من منشور يتغير معامل انكساره مع الطول الموجى (تفريق) ومن عدسات أو مرايا تقوم بتكوين صورة للفتحة عند كل طول موجى منبعث من المصدر الضوئى .

أسئلة وتخمينات

1 درسنا فى الفصل الثالث والعشرين أن للصورة فى المرآة المستوية نفس حجم الجسم . فلماذا إذن نقرب وجوهنا من المرآة عندما نود فحص أعيننا المحتقنة ؟

2 إثبت أن الصورة الحقيقية لسيدة والتى تكونها عدسة مجمعة تكون مقلوبة وإن كانت هى وصورتها لا تزال لهما نفس اليد اليمنى . إثبت أن العكس هو الصحيح بالنسبة للصورة التى تتكون بواسطة مرآة مستوية .

3 تتكون صور أوضح فى الأجهزة البصرية عند استعمال جزء صغير فحسب من العدسة . وفى حالة الكاميرا ذات الثقب لا يستعان بأى عدسة . ولكى ترى أن هذا ممكن ، ارسم جسمًا صغيرًا مضيئًا ، ارتفاعه نحو 1 mm ، ويبعد نحو 10 cm من ثقب مقداره 1 cm فى حائل معتم كبير . بين كيف ينقص حجم البقعة المضيئة التى يكونها الجسم على حائل يبعد 5 cm وراء الفتحة ، كلما جعلت الفتحة أصغر . إثبت أنه عندما تصير الفتحة ثقبًا صغيرًا كرأس الدبوس ، فإن جسمين يبعدان عن بعضهما مسافة 1 cm وبينهما وبين الثقب 10 cm سيكونان صورتين واضحتين وحادتين على الحائل .

4 بين السبب فى أن العدسة إذا وضع أمامها ثقب صغير ، فإنها تكون صورة جيدة حتى إذا لم تكن الصورة فى البؤرة تمامًا . (راجع السؤال رقم 3) .

5 يحرف منشور زجاجى حزمة من الضوء الأزرق أكثر نوعًا ما من حزمة من الضوء الأحمر بين باستخدام الجبهات الموجية ، كيف يؤدى هذا بنا إلى استنتاج أن الضوء الأحمر ينتقل بسرعة أكبر عبر الزجاج .

6 أى الأجهزة البصرية التالية يكوّن صورًا حقيقية عند الاستعمال الطبيعى له : (أ) العين ، (ب) الكاميرا ، (جـ) الميكروسكوب ، (د) التليسكوب ، (هـ) النظارة المعظمة (ذات العينيتين) . (و) آلة عرض الشرائح ، (ز) المرآة المستوية ، (ح) مرآة الحلاقة المقعرة ، (ط) مرآة المصباح الكشاف .

7 اشرح بوضوح السبب فى أن الخطوط الطيفية تسمى خطوطًا .

8 من الممكن شراء ميكروسكوب رخيص لاستعمال الأطفال . على أن الصورة المتكونة فى هذا الميكروسكوب دائمًا ما تكون ذات حواف ملونة . لماذا تحدث هذه الظاهرة ؟

9 افترض أن الكاميرا الصندوقية قد ملئت بالماء وأن العدسة قد جعلت أقوى بحيث ظلت الصورة تتكون على سطح الفيلم . هل ستتغير الصور التى تلتقطها الكاميرا بشكل أو آخر ؟ أعد السؤال بالنسبة لصندوق ذى ثقب صغير وبدون عدسات على الإطلاق .

10 ما هى أهمية سرعة المغلق وسرعة العدسة لآلة تصوير معينة ؟ وما هى اعتبارات التصميم التى تؤثر على هاتين السرعتين ؟

11 إذا كان قطر فتحة العدسة أى قطر الفتحة فى كاميرا تجارية هو 5 mm ، فإن زمن التعريض الصحيح لمنظر ما يكون 1/60 s . ما هو زمن التعريض الصحيح بالنسبة لكاميرا ذات ثقب تستخدم نفس نوع الفيلم ، إذا كان قطر الثقب هو 0.50 mm ؟

12 لديك أنبوبة طويلة من الورق المقوى كالتى تستعمل فى إرسال الأوراق بالبريد ولديك عدستان ، بعداهما البؤريين هما 60 cm ، 10 cm على الترتيب ويمكن تركيبهما فى الأنبوبة الأسطوانية المذكورة . كيف تستخدم هذه الأشياء لتصنع تليسكوبًا للأطفال . ما هو تكبير هذا التليسكوب عند استخدامه لرؤية أجسام بعيدة ؟ وكيف تثبت هاتين العدستين بالأنبوبة لكى تعملا كميكروسكوب ؟ قيم أداء هذا الميكروسكوب .

مسائل

القسم 1-25 (فيما يلى ، يمكنك إهمال المسافة بين العين والعدسة التصحيحية)

1 تبعد شجرة ارتفاعها 4.0 m عن شخص ما 16 m . ما هو ارتفاع الصورة على شبكية ذلك الشخص ؟ اعتبر أن عدسة العين تبعد عن الشبكية 1.5 cm .

2 إذا كان ارتفاع صورة جسم على شبكية شخص 0.54 mm عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة للعين (25 cm) ، فما يكون الارتفاع إذا كان الجسم على بعد 4.0 m ؟

3 النقطة البعيدة لشخص عينه مصابة بطول النظر هو 90 cm . والأجسام الأقرب من 90 cm لا يمكن أن ترى بوضوح . وتستخدم عدسة مجمعة لتصحيح رؤية كتاب موضوع على بعد 25 cm من العين . ما هو البعد البؤرى لتلك العدسة ؟

4 يستطيع طالب مصاب بقصر النظر أن يرى ما كتب على السبورة فى الفصل بوضوح فقط عندما يجلس على مسافة أقل من 1.6 m من السبورة . ما البعد البؤرى لنظارات الطالب الواجب توفره حتى يرى الطالب الأجسام البعيدة بوضوح ؟

5 يرتدى شخص ما نظارة بعدها البؤرى -80 cm . أين تقع النقطة البعيدة لذلك الشخص ؟

6 ورد فى كشف نظارة شخص ما أن $f = +60$ cm . ما هو نوع العيب فى عين الشخص .

7 تغير كشف النظارة الطبية لطالب من $f = -120$ cm إلى $f = -90$ cm خلال عام واحد . ما هو مقدار التغير فى النقطة القريبة لعين ذلك الطالب ؟

■ 8 يرتدى طفل نظارة ذات عدسات سميكة من نوع العدسات المكبرة . أما أخوه الأكبر فيمسك بالنظارة فى ضوء الشمس ويحصل على صور للشمس حيث تعطى كل عدسة صورة للشمس على بعد 42 cm من العدسة . ما هى النقطة البعيدة المحتملة لعين الطفل وكذا النقطة القريبة بدون استعمال النظارة ؟

■ 9 يرتدى شخص يعانى من طول النظر نظارة بعدها البؤرى $f = +35$ cm . وكانت النقطة القريبة لذلك الشخص بدون النظارة 60 cm . ما هى النقطة القريبة المصححة لذلك الشخص ؟

القسم 2-25

10 يستخدم فى كاميرا بسيطة عدسة منفردة بعدها البؤرى 10 cm ، وكان حجم الصورة التى تتكون على الفيلم 35 mm . ما المسافة التى يوجد عندها جسم طوله 3 m بالنسبة للكاميرا إذا أريد للصورة أن تتكون فى حيز الفيلم ؟

11 المسافة من العدسة إلى الفيلم فى كاميرا ذات عدسة واحدة هى 6 cm ، وتلتقط الكاميرا صورًا حجمها 6 cm × 4 cm . ما هو بعد الكاميرا عن لوحة حجمها 80 cm × 80 cm الواجب وضعها عنده حتى تنضبط صورة اللوحة على حيز الفيلم ؟

12 عندما تستخدم الكاميرا الواردة فى المسألة رقم 11 لتصوير برج يقع على مسافة 20 cm ، فإن الصورة التى تتكون على الفيلم يكون ارتفاعها 1.8 cm . ما هو ارتفاع البرج ؟

■ 13 تقوم كاميرا ذات عدسة واحدة بتكوين صورة واضحة لجسم بعيد عند ما تكون العدسة على مسافة 7 cm من الفيلم . (أ) ما هو البعد البؤرى للعدسة ؟ (ب) ما المسافة التى يجب تحريك العدسة بها للحصول على أفضل تركيز فى البؤرة لجسم يبعد 3 m ؟

■ 14 يستخدم فى كاميرا صندوقية ذات عدسة ثابتة ، عدسة بعدها البؤرى 25 cm ولوح فوتوغرافى يبعد 25 cm عن العدسة . وقد التقطت صورة لجسم يبعد 4 m عن الكاميرا . كم تبعد الصورة التى تكونت عن اللوح الفوتوغرافى ؟

■ 15 تقوم كاميرا قطر فتحتها (فتحة العدسة بها) 50 mm بالتقاط صورة لجسم بشكل مضبوط عندما يكون زمن التعريض 1/50 s . فإذا قل قطر الفتحة إلى 35 mm فكم يكون زمن التعريض اللازم لالتقاط صورة بنفس الجودة ؟

القسم 3-25

16 استعملت عدسة بعدها البؤرى 6 cm كعدسة مكبرة . (أ) أين يجب وضع الجسم للحصول على أكبر قيمة للتكبير ؟ (ب) وما قيمة ذلك التكبير ؟

17 تكبر عدسة مكبرة صورة جسم ما بتكبير زاوى مقداره 5 . ما هو البعد البؤرى للعدسة تقريبًا ؟

18 يستخدم شخص نقطته القريبة 20 cm عدسة مكبرة بعدها البؤرى 6 cm . ما هو التكبير الذى يحصل عليه عند (أ) نقطته القريبة ، (ب) مالانهاية ؟

■ 19 تستطيع طالبة نقطتها القريبة 25 cm أن ترى بعوضة طولها 0.3 mm بعينها المجردة . ثم تستخدم عدسة مكبرة بعدها البؤرى 8 cm لرؤية نفس البعوضة . ما هى النسبة بالتقريب بين حجمى الصورتين على الشبكية ؟

20 تستعمل عدسة مكبرة بعدها البؤرى 7.0 cm بواسطة طالب قصير النظر بحيث تتكون الصورة النهائية عند النقطة القريبة له وهى 15 cm . ما التكبير الذى حصل عليه الطالب ؟

■ 21 يستخدم أحد هواة جمع الطوابع عدسة مكبرة ذات تكبير زاوى مقداره 8 حيث يضع الطابع على مسافة 5 cm من العدسة . (أ) أين تتكون صورة الطابع ؟ (ب) وهل هى تقديرية أم حقيقية ؟

القسم 4–25

22 ما هو التكبير التقريبى لميكروسكوب عدسته الشيئية ذات بعد بؤرى مقداره 3 cm والبعد البؤرى لعينيته 9 cm ؟ اعتبر أن المسافة بين العدستين 18 cm .

23 تحدث شيئية ميكروسكوب بمفردها تكبيرًا مقداره 20 . ما هو البعد البؤرى المطلوب فى العينية حتى يكون التكبير الكلى 2000 ؟ اعتبر أن الصورة النهائية تتكون على بعد 25 cm من العين وأن المسافة بين العدستين هى 18 cm .

24 يراد أن يكون التكبير فى ميكروسكوب ما 900 . ولهذا الميكروسكوب أنبوبة طولها 18 cm وتستخدم عدسة شيئية بعدها البؤرى 0.90 cm . أوجد البعد البؤرى للعدسة العينية المطلوبة .

25 يبلغ طول أنبوبة ميكروسكوب 18 cm ويستخدم الميكروسكوب عدسة عينية بعدها البؤرى 4.0 cm وعدسة شيئية بعدها البؤرى 1.0 cm . ما هو التكبير التقريبى للميكروسكوب ؟

■ 26 يبلغ تكبير العدسة الشيئية لميكروسكوب مركب 40 وطول أنبوبته 20 cm . ويستخدم فى الميكروسكوب عينية تكبيرها 16 . ما هو البعد البؤرى لكل من (أ) العينية ؟ و (ب) الشيئية ؟ (جـ) ما هو التكبير الكلى للميكروسكوب ؟

■ 27 قام طالب بصناعة ميكروسكوب بأن ثبت عدسة بعدها البؤرى 6.0 cm إلى أحد طرفى أنبوبة طولها 18 cm وعدسة بعدها البؤرى 3.0 cm عند الطرف الآخر . (أ) أين بالتقريب عليه أن يضع العينة المراد فحصها أمام الشيئية ؟ (ب) ما هو التكبير التقريبى لهذا الميكروسكوب ؟

■ 28 تتكون الصورة الأولى لحشرة فى ميكروسكوب معملى على مسافة 16 cm من العدسة الشيئية . وكانت الحشرة على مسافة 4.00 mm من الشيئية عندما كانت صورتها فى البؤرة . أوجد البعد البؤرى للعدسة الشيئية .

القسم 5–25

29 يستخدم تليسكوب فلكى لرؤية القمر وهو مجهز بعدسة شيئية بعدها البؤرى 60 cm وعدسة عينية بعدها البؤرى 3.0 cm . ما هو التكبير الزاوى للقمر باستعمال هذا التليسكوب ؟

30 لتليسكوب فلكى عدسة شيئية قطرها 15 cm وبعدها البؤرى 75 cm . ما هو تكبير التليسكوب إذا كان يستخدم مع عدسة عينية بعدها البؤرى 2.5 cm ؟

31 يستخدم تليسكوب عدسة عينية تكبيرها 5 ، والمسافة بين العينية والشيئية 55 cm . ما هو التكبير الإجمالى للتليسكوب ؟

32 البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى تليسكوب فى أحد المراصد هو 16 m . وعندما يستعمل هذا التليسكوب لرصد القمر ، فما هى المسافة على سطح القمر التى تناظر 1 cm على الصورة التى تكونها العدسة الشيئية ؟ (المسافة بين الأرض والقمر هى 3.8×10^8 m) .

■ 33 ما هى قوة تكبير تليسكوب يستخدم عدسة شيئية بعدها البؤرى 100 cm وعينية قوة تكبيرها 6 ؟

■ 34 المسافة بين العدسة الشيئية والعينية فى تليسكوب معين تبلغ 100 cm والتكبير الزاوى للتليسكوب 70 . أوجد البعدين البؤريين للعدستين .

■ 35 افترض أنك تنظر إلى مبنى ارتفاعه 18 m ويبعد عنك مسافة 600 m من خلال تليسكوب قوة تكبيره الإجمالية 12 . ما هى الزاوية التى تقابل المبنى عند عينيك مقدرة بالتقدير الدائرى ؟

36 تليسكوب عاكس يستعمل مرآة شيئية بعدها البؤرى 80 cm . (أ) ما هو حجم صورة القمر التى تكونها هذه المرآة ؟ ، (ب) وإذا استعملت عدسة عينية بهذا التليسكوب وبعدها البؤرى 5.0 cm فكم تكون قوة تكبير هذا التليسكوب ؟ (اعتبر المسافة إلى القمر 3.8×10^8 m وقطر القمر 3.5×10^6 m) .

37 يحتاج تليسكوب عدسته الشيئية لها قطر مقداره 20 cm إلى 2.5 min. من زمن التعريض لكى يلتقط صورة واضحة لنجم بعيد . كم يبلغ زمن التعريض المناسب إذا كان قطر العدسة الشيئية للتليسكوب 25 cm ؟

38 يستخدم تليسكوب كاسر عدسة شيئية بعدها البؤرى 1.8 m وعدسة عينية بعدها البؤرى +10 cm . وإذا نظرت إلى برج بعيد خلال هذا التليسكوب ، فبكم مرة سيبدو البرج أكبر ؟

القسم 25-6

39 تسقط حزمة ضوء مكونة من طولين موجيين فقط هما λ_1 = 434 nm (بنفسجى) و λ_2 = 589 nm (أصفر) بزاوية مقدارها 40° على شريحة مستوية من زجاج فلنت . أوجد الزاوية المحصورة بين الحزمتين داخل الشريحة الزجاجية . معامل انكسار زجاج فلنت هو 1.528 للبنفسجى و 1.517 للأصفر .

40 تسقط حزمة ضوئية من مصدر يبعث بثلاثة أطوال موجية هى 434 nm و 656 nm و 768 nm بزاوية مقدارها 60° على سطح شريحة مستوية من زجاج كراون ، الذى تبلغ معاملات انكساره 1.546 و 1.520 و 1.517 على الترتيب للأطوال الموجية الثلاثة . احسب التباعد الزاوى بين كل اثنين من الحزم المتجاورة داخل الشريحة الزجاجية .

41 تتعلق هذه المسألة بالقسم 25-6 والشكل 25-14 . وكلما تغيرت زاوية سقوط الضوء على الوجه الأمامى للمنشور ، فإن زاوية الانحراف D هى الأخرى تتغير . ويمكن إثبات أن الزاوية D تكون عند حدها الأدنى عندما يكون شعاع الضوء داخل المنشور موازيًا لقاعدة المنشور . ويتيح لنا قياس زاوية الانحراف الصغرى D_{min} ، إيجاد معامل انكسار مادة المنشور . اثبت أن معامل انكسار المنشور يعطى بالمعادلة :

$$n = \frac{\sin[\frac{1}{2}(A + D_{\min})]}{\sin(A/2)}$$

حيث A زاوية رأس المنشور .

42 يبلغ معامل انكسار زجاج معين 1.4650 بالنسبة للطول الموجى λ = 440 nm و 1.4570 عندما λ = 580 nm . احسب زاوية الانحراف الصغرى لكل من هذين الطولين عندما يسقطان على منشور مصنوع من هذا الزجاج وزاوية رأسه 60° .
تلميح : استخدم نتيجة المسألة 41 .

43 إثبت أنه عندما يكون المنشور رقيقًا جدًا وزاوية رأسه A صغيرة جدًا فإن زاوية الانحراف D تعطى بالمعادلة $D = A(n - 1)$ عندما تكون زوايا السقوط صغيرة .

44 تسقط حزمة ضوئية بزاوية مقدارها 48° على وجه منشور زاوية رأسه 60° ومعامل انكسار مادة المنشور لهذا الضوء هو 1.590 . أوجد (أ) الزاوية التى تغادر بها الحزمة المنشور و (ب) زاوية انحراف هذه الحزمة D .

45 يسقط ضوء أصفر طوله الموجى 589 nm على وجه منشور من الكوارتز المنصهر بزاوية سقوط مقدارها 72° . وزاوية رأس المنشور مقدارها 60° ومعامل انكسار مادته للضوء الأصفر هو 1.458 . أوجد (أ) زاوية الانكسار عند الوجه الأول ، (ب) زاوية السقوط على الوجه الثانى ، (جـ) زاوية الانكسار عند الوجه الثانى و (د) زاوية الانحراف بين الشعاعين الساقط والخارج .

مسائل عامة

46 إثبت أن طول صورة جسم ما على الشبكية يتناسب عكسيًا مع بعد الجسم عن العين .

■ 47 لاحظ مدرس أن طفلاً فى فصله يمسك بالصفحات على بعد 15 cm من عينيه عند القراءة . (أ) هل الطفل مصاب بقصر النظر أم بطول النظر ؟ (ب) ما هو نوع العدسة الواجب استعمالها لتصحيح نظر الطفل ، وكم يجب أن يكون بعدها البؤرى ؟

■■ 48 يحاول مخبر خاص نقطته القريبة 16 cm أن يستخدم عدسة مفرقة كعدسة مكبرة . (أ) كم يجب أن يكون البعد البؤرى للعدسة حتى يمكن للمخبر أن يرى صورة واضحة ؟ (ب) إذا كان البعد البؤرى للعدسة $f = -50$ cm . فما هو أقصى تكبير يمكن الحصول عليه ؟

■■ 49 استُخدم ميكروسكوب لرؤية علامتين البعد بينهما 0.0300 mm . ما هى الزاوية التى يقابلانها (مقاسة بالدرجات) عند العين عندما تشاهدان عبر ميكروسكوب قوة تكبيره 360 ؟

■■ 50 يستخدم ميكروسكوب قياسى (طول أنبوبته 18 cm) عدسة شيئية تحدث تكبيرًا مقداره 20 وعدسة عينية تكبيرها 5 . افترض أن الشيئية ×20 والعينية ×5 وضعتا فى ميكروسكوب طول أنبوبته 18.75 cm . احسب النسبة بين التكبير الإجمالى للوضع الأخير وتكبير الميكروسكوب القياسى .

■■ 51 تغير قطر الشيئية فى تليسكوب ما من 0.80 cm إلى 4.0 cm . (أ) ما هى نسبة زيادة شدة الضوء فى التليسكوب لو أن كل الأبعاد الأخرى ظلت ثابتة ؟ (ب) ما هى نسبة تغير شدة الضوء إذا ضوعف أيضًا البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى نفس الوقت مع زيادة القطر ؟

■■ 52 لدى أحد الطلاب عدستان زجاجيتان بعداهما البؤريان هما +100 cm و +36 cm ، ويرغب فى وضعهما داخل أنبوبة أسطوانية من الورق المقوى لكى يصنع تليسكوبًا يكون أقصر ما يكون من حيث الطول ولديه مع ذلك أكبر تكبير زاوى ممكن . (أ) ما هى المسافة بالتقريب بين العدستين ؟ (ب) كم سيكون تكبير التلسكوب تقريبًا ؟

■■ 53 لقد علمنا فى القسم 5-25 أن التليسكوب الفلكى يكوّن صورًا مقلوبة وقد يكون هذا مثار إعتراض إذا أراد الشخص أن يشاهد أوبرا من مقعد بعيد فى دار الأوبرا . وكبديل عن هذا يمكن للإنسان أن يستعمل نظارة أوبرا تسمى تليسكوب جاليليو . واحد أمثلة تليسكوبات جاليليو تستخدم فيه عدسة شيئية بعدها البؤرى +40 cm وعدسة عينية بعدها البؤرى −20 cm وتوضع على مسافة 10 cm من العدسة الشيئية . حدد موقع الصورة النهائية لجسم بعيد والتى تكونت بهذه المجموعة من العدسات . هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟ وما هو التكبير الإجمالى لهذا التليسكوب ؟

■■ 54 لديك نوع معين من الزجاج معامل انكساره 1.650 للضوء الأزرق ذى الطول الموجى 430 nm ، ومعامل انكساره 1.615 للضوء الأحمر ذى الطول الموجى 680 nm . وتسقط حزمة ضوئية تحتوى على الطولين الموجيين المذكورين بزاوية سقوط مقدارها 70° على أحد أوجه منشور مصنوع من هذا الزجاج . وكانت زاوية رأس المنشور تساوى 60° . أوجد التباعد الزاوى $D_b - D_r$ (وهو ما يسمى أيضًا التفريق) للطولين الموجيين عندما يخرجان من الوجه المقابل للمنشور .